

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Ivan Lončar

Zagreb, 2016.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Nastia Degiuli, dipl. ing.

Student:

Ivan Lončar

Zagreb, 2016.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem mentorici prof. dr. sc. Nastiji Degiuli, dipl. ing. brodogradnje, dipl. ing. brodogradnje Ivanu Muniću i asistentici Ivani Martić, dipl. ing. brodogradnje na pruženoj stručnoj pomoći i savjetima pri izradi ovog završnog rada te Hrvatskom udruženju studenata brodogradnje koje mi je omogućilo što kvalitetniju izradu rada.

Također, zahvaljujem svojoj obitelji, kolegama i prijateljima koji su mi bili podrška tijekom dosadašnjeg studiranja.

Ivan Lončar



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE
Središnje povjerenstvo za završne i diplomске ispite
Povjerenstvo za završne i diplomске ispite studija brodogradnje



Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Ivan Lončar**

Mat. br.: 0035183942

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **EKSPERIMENTALNO ODREĐIVANJE OTPORA PLOVILA NA LJUDSKI POGON**

Naslov rada na engleskom jeziku: **EXPERIMENTAL DETERMINATION OF THE HUMAN POWERED CRAFT RESISTANCE**

Opis zadatka:

Otpor trupa je osnovna značajka pri projektiranju odgovarajućeg propulzijskog sustava plovila. Sve veći napredak računalnih metoda u određivanju otpora plovila i dalje nije nadomjestio eksperimentalna ispitivanja. Eksperiment je nužan za umjeravanje i potvrđivanje rezultata računalnih metoda kao i za ispitivanje novih nestandardnih oblika plovila. Plovila pogonjena ljudskom snagom su nestandardna u pogledu relativno male snage kojom raspolažu za postizanje što veće brzine, a uz to su i nedovoljno sustavno istraživana. Takva plovila je moguće ispitivati u prirodnoj veličini tj. korelacija model-brod nije potrebna i na taj način se postiže veća točnost rezultata.

U završnom radu za posebno plovilo pogonjeno ljudskom snagom slijedećih karakteristika:

- tip plovila: katamaran,
- pogon: 2 osobe,
- tip kormila: jedno, smješteno između trupova,

potrebno je:

1. Eksperimentalno odrediti krivulju snage otpora u ovisnosti o brzini za trupove s i bez kormila.
2. Pokus je potrebno provesti s plovilom u prirodnoj veličini na usporedivim gazovima s i bez kormila. Povlačenje plovila potrebno je provesti prikladnim motornim čamcem.
3. Rezultate pokusa potrebno je usporediti s rezultatima dobivenim numeričkim proračunom te analizirati odstupanja dobivenih vrijednosti kao i eventualne nedostatke samog pokusa.

Rezultate proračuna prikazati odgovarajućim tablicama, dijagramima i slikama.

U radu treba navesti literaturu i eventualno dobivenu pomoć tijekom izrade.

Zadatak zadan:

25. studenog 2015.

Zadatak zadao:

Rok predaje rada:

1. rok: 25. veljače 2016

2. rok (izvanredni): 20. lipnja 2016.

3. rok: 17. rujna 2016.

Predviđeni datumi obrane:

1. rok: 29.2., 02. i 03.03. 2016.

2. rok (izvanredni): 30. 06. 2016.

3. rok: 19., 20. i 21. 09. 2016.

Predsjednica Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Nastia Degiuli

Prof. dr. sc. Nastia Degiuli

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA.....	V
POPIS OZNAKA	VI
SAŽETAK.....	VII
SUMMARY	VIII
1. UVOD.....	1
2. OPĆENITO O OTPORU BRODOCIKLA	2
2.1. Kratki povijesni pregled.....	2
2.2. Komponente otpora.....	2
2.2.1. Otpor trenja	3
2.2.2. Otpor valova.....	4
2.2.2.1. Interferencija valova	5
2.3. Konfiguracija brodocikla	6
2.4. Katamaran	8
2.5. Kormilo	8
3. PLANIRANJE POKUSA	10
3.1. Predviđeni otpor, gaz i brzina	10
3.2. Oprema.....	13
3.3. Način provođenja pokusa.....	13
3.4. Način postavljanja brodocikla na predviđeni gaz	14
3.5. Lokacija.....	15
4. PROVEDBA POKUSA.....	16
4.1. Konfiguracija opreme	16
4.1.1. Brod za vuču i specifikacije	16
4.1.2. Dinamometar.....	17
4.1.2.1. Dinamometar 1.....	17
4.1.2.2. Dinamometar 2.....	18
4.1.3. Uže za tegljenje.....	19
4.1.4. GPS uređaji za mjerenje brzine.....	20
4.2. Predradnje za provođenje pokusa	20
4.2.1. Mjerenje gazova.....	21
4.2.2. Izrada konstrukcije.....	23
4.2.2.1. Vezanje užeta za brodocikl	23
4.2.2.2. Centracija užeta.....	24

4.3. Pokus	24
4.3.1. Probna vožnja.....	25
4.3.2. Nulta vožnja	26
4.3.3. Prva vožnja.....	27
4.3.3.1. Promjena konstrukcije i veza	29
4.3.4. Druga vožnja	30
4.3.4.1. Montaža i fiksiranje kormila.....	30
4.3.5. Treća vožnja.....	31
4.3.5.1. Ponovno fiksiranje kormila.....	32
4.3.6. Četvrta vožnja	32
4.4. Radnje po završetku pokusa.....	32
5. ANALIZA REZULTATA	33
5.1. Nulta vožnja	33
5.2. Prva vožnja.....	36
5.3. Druga vožnja	39
5.4. Treća vožnja	42
5.5. Četvrta vožnja	45
6. USPOREDBA S NUMERIČKIM PRORAČUNOM OTPORA.....	48
6.1. Usporedba eksperimentalnog određivanja otpora plovila s numeričkim programom u drugoj vožnji	48
6.2. Usporedba eksperimentalnog određivanja otpora plovila s numeričkim programom u četvrtoj vožnji	53
7. ZAKLJUČAK.....	57
LITERATURA.....	58

POPIS SLIKA

Slika 1.	Interferencija valova	6
Slika 2.	Konfiguracija brodocikla	7
Slika 3.	Brodocikl s dva vozača na jezeru Jarun	7
Slika 4.	Provođenje pokusa tegljenja s brodociklom.....	13
Slika 5.	Centracija trupova brodocikla.....	14
Slika 6.	Mjerenje dijagonala trupova	14
Slika 7.	Lokacija provedbe pokusa – Jarunsko jezero.....	15
Slika 8.	Prikaz broda za vuču	16
Slika 9.	Brod za vuču	17
Slika 10.	Dinamometar 1	17
Slika 11.	Dinamometar 2	18
Slika 12.	Baždarenje dinamometra	19
Slika 13.	Uže za tegljenje	20
Slika 14.	Mjerenje gazova brodocikla.....	22
Slika 15.	Konstrukcija povlačenja plovila	23
Slika 16.	Prikaz vezanja užeta za brodocikl	24
Slika 17.	Način centracije užeta	24
Slika 18.	Način tegljenja brodocikla brodom za vuču (probna vožnja)	26
Slika 19.	Način tegljenja kod nulte vožnje	27
Slika 20.	Konstrukcija veza kod nulte vožnje.....	27
Slika 21.	Način tegljenja kod prve vožnje	28
Slika 22.	Konstrukcija veza kod prve vožnje.....	28
Slika 23.	Način tegljenja brodocikla kod druge, treće i četvrte vožnje.....	29
Slika 24.	Način veza brodocikla kod druge, treće i četvrte vožnje	30
Slika 25.	Montaža i fiksiranje kormila.....	31
Slika 26.	Ovisnost sile otpora o brzini brodocikla u nultoj vožnji.....	34
Slika 27.	Ovisnost sile otpora o srednjoj vrijednosti brzine brodocikla u nultoj vožnji.....	34
Slika 28.	Ovisnost snage i brzine brodocikla u nultoj vožnji.....	35
Slika 29.	Ovisnost snage i srednje vrijednosti brzine brodocikla u nultoj vožnji	35
Slika 30.	Ovisnost sile otpora o brzini brodocikla u prvoj vožnji.....	37
Slika 31.	Ovisnost sile otpora o srednjoj vrijednosti brzine brodocikla u prvoj vožnji	37
Slika 32.	Ovisnost snage i brzine brodocikla u prvoj vožnji.....	38
Slika 33.	Ovisnost snage i srednje vrijednosti brzine brodocikla u prvoj vožnji	38
Slika 34.	Ovisnost sile otpora o brzini brodocikla u drugoj vožnji	40
Slika 35.	Ovisnost sile otpora o srednjoj vrijednosti brzine brodocikla u drugoj vožnji	40
Slika 36.	Ovisnost snage i brzine brodocikla u drugoj vožnji.....	41

Slika 37.	Ovisnost snage i srednje vrijednosti brzine brodocikla u drugoj vožnji	41
Slika 38.	Ovisnost sile otpora o brzini brodocikla u trećoj vožnji	43
Slika 39.	Ovisnost sile otpora o srednjoj vrijednosti brzine brodocikla u trećoj vožnji	43
Slika 40.	Ovisnost snage i brzine brodocikla u trećoj vožnji	44
Slika 41.	Ovisnost snage i srednje vrijednosti brzine brodocikla u trećoj vožnji	44
Slika 42.	Ovisnost sile otpora o brzini brodocikla u četvrtoj vožnji	46
Slika 43.	Ovisnost sile otpora o srednjoj vrijednosti brzine brodocikla u četvrtoj vožnji	46
Slika 44.	Ovisnost snage i brzine brodocikla u četvrtoj vožnji	47
Slika 45.	Ovisnost snage i srednje vrijednosti brzine brodocikla u četvrtoj vožnji	47
Slika 46.	<i>Michlet</i> sučelje	48
Slika 47.	Numerički dobivena krivulja sile otpora	49
Slika 48.	Usporedba numeričkog proračuna s eksperimentom (ovisnost sile otpora i brzine brodocikla u drugoj vožnji)	51
Slika 49.	Usporedba numeričkog proračuna s eksperimentom (ovisnost sile otpora i srednje vrijednosti brzine brodocikla u drugoj vožnji)	51
Slika 50.	Usporedba numeričkog proračuna s eksperimentom (ovisnost snage i brzine brodocikla u drugoj vožnji)	52
Slika 51.	Usporedba numeričkog proračuna s eksperimentom (ovisnost snage i srednje vrijednosti brzine brodocikla u drugoj vožnji)	52
Slika 52.	Numerički proračun oba trupa i kormila <i>Michlet</i> programom	53
Slika 53.	Krivulja ukupnog otpora dobivena numerički za četvrtu vožnju	54
Slika 54.	Usporedba numeričkog proračuna s eksperimentom (ovisnost sile otpora i brzine brodocikla u četvrtoj vožnji)	55
Slika 55.	Usporedba numeričkog proračuna s eksperimentom (ovisnost sile otpora i srednje vrijednosti brzine brodocikla u četvrtoj vožnji)	55
Slika 56.	Usporedba numeričkog proračuna s eksperimentom (ovisnost snage i brzine brodocikla u četvrtoj vožnji)	56
Slika 57.	Usporedba numeričkog proračuna s eksperimentom (ovisnost snage i srednje vrijednosti brzine brodocikla u četvrtoj vožnji)	56

POPIS TABLICA

Tablica 1. Izračun ukupne mase, gaza i istisnine	12
Tablica 2. Skala vlačne sile dinamometra 2	19
Tablica 3. Prikaz funkcija sudionika pokusa	21
Tablica 4. Vrijednosti gazova za probnu, nultu, prvu i drugu vožnju	22
Tablica 5. Vrijednosti ponovnog mjerenja gazova za treću i četvrtu vožnju	31
Tablica 6. Analiza rezultata nulte vožnje	33
Tablica 7. Analiza rezultata prve vožnje	36
Tablica 8. Analiza rezultata druge vožnje	39
Tablica 9. Analiza rezultata treće vožnje	42
Tablica 10. Analiza rezultata četvrte vožnje	45
Tablica 11. Analiza usporedbe numeričke analize i eksperimenta za drugu vožnju	50
Tablica 12. Usporedba numeričkog proračuna i eksperimenta za četvrtu vožnju	54

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
R_T	N	ukupni otpor
R_V	N	viskozni otpor
R_W	N	otpor valova
R_F	N	otpor trenja ravne ploče
P_E	W	efektivna snaga
v	m/s	brzina broda
S	m ²	oplakana površina
f	-	koeficijent otpora trenja ploče
n	-	eksponent ovisan o duljini i hrapavosti ploče
C_F	-	koeficijent otpora trenja
Rn	-	Reynoldsov broj
C_b	-	koeficijent punoće brodskog trupa
Fn	-	Froudeov broj
L	m	duljina broda
g	m/s ²	ubrzanje zemljine sile teže
P_N	W	prosječna snaga čovjeka
η_0	-	koeficijent iskoristivosti vijka
η_H	-	koeficijent korisnosti trupa
η_R	-	koeficijent prijelaza
η_M	-	mehanički koeficijent
U	N	sila uzgona
ρ_0	kg/m ³	gustoća medija
$m_{brodocikl}$	kg	ukupna masa brodocikla
m_{N1}	kg	masa vozača 1
m_{N2}	kg	masa vozača 2
m_{okvir}	kg	masa okvira
$m_{trupovi}$	kg	masa trupova
D	N	težina
V	čv	brzina broda
V_{sr}	čv	srednja brzina broda
V_{Gps1}	čv	brzina broda izmjerena pomoću uređaja GPS 1
V_{Gps2}	čv	brzina broda izmjerena pomoću uređaja GPS 2

SAŽETAK

Otpor trupa plovila osnovna je značajka pri projektiranju odgovarajućeg propulzijskog sustava plovila.

Cilj ovog rada je eksperimentalno određivanje otpora plovila na ljudski pogon u ovisnosti o brzini za trupove sa i bez kormila prema postojećem natjecateljskom brodociklu Fakulteta strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu.

Pokus je proveden s plovilom u prirodnoj veličini, a tegljenje plovila provedeno je prikladnim motornim čamcem.

Rezultati pokusa uspoređeni su s rezultatima dobivenima numeričkim proračunom te su analizirana eventualna odstupanja dobivenih vrijednosti.

Ključne riječi: *brodocikl, katamaran, ukupni otpor, eksperiment, kormilo*

SUMMARY

The hull resistance is the main feature in the design of the corresponding propulsive system of the vessel.

The aim of this paper is experimental determination of the resistance of the human-powered craft, depending on the speed of the hulls with and without the rudder according to the existing competitive waterbike of the Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture of University of Zagreb.

The experiment was performed with the full scale vessel and the towing of the vessel was carried out by the appropriate motor boat.

The test results were compared with the results of numerical analysis and the possible deviations between the experimental and numerical values are obtained.

Key words: *waterbike, catamaran, total resistance, experiment, rudder*

1. UVOD

U svibnju 2015. godine Hrvatsko udruženje studenata brodogradnje (HUSB) sudjelovalo je na 35. međunarodnom natjecanju brodocikala pod nazivom *International Waterbike Regate (IWR)* u Berlinu. Riječ je o europskom natjecanju koje okuplja studente tehničkih fakulteta koji konstruiraju plovila na ljudski pogon. To je višednevno natjecanje na kojem se grupe studenata natječu u brojnim disciplinama osmišljenima tako da do izražaja dođu performanse plovila i kondicijska spremnost natjecatelja. Po završetku natjecanja, na kojemu su studenti Fakulteta strojarstva i brodogradnje, tj. članovi HUSB-a ostvarili solidne rezultate, zaključeno je kako je otpor brodocikla, odnosno specijalnog plovila katamaranskog tipa pogonjenog isključivo snagom ljudskih mišića, prevelik. S ciljem ostvarivanja što boljih rezultata, ali i unaprjeđenja konstrukcije brodocikla, važno je eksperimentalno odrediti otpor plovila na ljudski pogon. Dakle, cilj ovog rada je eksperimentalno odrediti otpor brodocikla kako bi se uvidjelo koje je dijelove konstrukcije brodocikla važno optimizirati, tj. poboljšati u svrhu smanjenja otpora.

Napredak numeričkih metoda u određivanju otpora plovila je sve veći, ali još uvijek ne može nadomjestiti eksperimentalna ispitivanja. Budući da je otpor trupa osnovna značajka pri projektiranju plovila na ljudski pogon, kao što je brodocikl koji za postizanje veće brzine raspolaže relativno malom snagom, nužno je eksperimentalno odrediti krivulju snage otpora brodocikla u ovisnosti o brzini. Nadalje, kako bi se postigla veća točnost rezultata, ovakva je plovila moguće ispitati u prirodnoj veličini, a tegljenje plovila moguće je provesti prikladnim motornim čamcem. Konačno, eksperimentalne rezultate potrebno je usporediti s rezultatima dobivenima numeričkim proračunom i potom analizirati odstupanja dobivenih vrijednosti, kao i eventualne nedostatke samog eksperimenta.

2. OPĆENITO O OTPORU BRODOCIKLA

2.1. Kratki povijesni pregled

Kako bi se brod gibao sa što manjom snagom kroz vodu, u prošlosti se na mnoge načine istraživalo kako umanjiti otpor plovila. Prva konkretnija istraživanja otpora broda bila su vezana uz potrebnu snagu pogonskog stroja kako bi se brod gibao određenom brzinom. Unatoč tome što istraživanja kroz povijest sežu u davno 15. stoljeće, tek je pojava parnog stroja iznjedrila interes brodograditelja za određivanjem potrebne snage parnog stroja u fazi osnivanja broda. Veliki doprinos istraživanju otpora broda dao je britanski znanstvenik William Froude 1870. godine. On je ukupni otpor podijelio na viskozni otpor i otpor valova na sljedeći način:

$$R_T = R_V + R_W \quad (1)$$

gdje je:

R_T – ukupni otpor, N,

R_V – viskozni otpor, N,

R_W – otpor valova, N.

2.2. Komponente otpora

Brod u plovidbi izaziva poremećaje u okolišu, vodi i zraku. Kako bi se brod, odnosno brodocikl, nesmetano kretao kroz vodu, neophodno je savladati silu otpora koja se tom gibanju istovremeno opire. Općenito govoreći, otpor broda jest sila koja se suprotstavlja njegovu gibanju i ovisi o raspodjeli strujanja vode oko trupa broda, odnosno sila kojom okolna tekućina djeluje na brod suprotno od smjera njegova gibanje.

„Otpor broda je sila kojom se sredina suprotstavlja pravocrtnom tegljenju broda jednolikom brzinom. Drugim riječima, otpor broda je sila tegljenja, odnosno sila potrebna za održavanje jednolike brzine plovidbe bez korištenja propulzora.“ [1].

Dakle, glavno nastojanje pri konstrukciji plovila jest projektirati takvu formu trupa koja će osigurati što je moguće manji otpor. Nadalje, snaga potrebna za svladavanje otpora broda naziva se efektivnom snagom ili snagom tegljenja kako slijedi:

$$P_E = R_T \cdot v \quad (2)$$

gdje je:

P_E - efektivna snaga, W,

R_T - ukupni otpor, N,

v - brzina broda, m/s.

Provođenjem pokusa otpora očitava se vrijednost ukupnog otpora brodocikla. Jedan dio viskoznog otpora posljedica je tangencijalnih naprezanja između vode i oplata broda i taj dio definiran je kao otpor trenja [2]. Preostali dio viskoznog otpora posljedica je promjene tlaka duž broda uzrokovane viskoznim pojavama unutar graničnog sloja. Mjerenje tlaka duž trupa broda pokazuje da se u realnoj (viskoznoj) tekućini ne ostvaruje tlak koji bi postojao u idealnoj tekućini.

U dodatne komponente otpora ubrajamo: otpor privjesaka, otpor hrapavosti oplata, otpor zraka i vjetra, otpor kormilarenja. Pored svih nabrojanih komponenata dodatni porast otpora može uslijediti i zbog utjecaja okoline, što podrazumijeva plovidbu u kanalu te plovidbu u plitkoj vodi.

U uvjetima službe dolazi do promjene, tj. do porasta otpora zbog utjecaja zraka i vjetra koji djeluju na nadvodni dio trupa, gibanja broda na valovima, odbijanja valova o trup broda (otpor difrakcije valova) i zaošijanja broda uslijed valova, vjetra i kormila.

2.2.1. Otpor trenja

Najveći udio u ukupnom otporu čini upravo otpor trenja i izravna je posljedica postojanja graničnog sloja i gibanja kroz viskozan fluid. Otpor trenja je rezultanta djelovanja sila u smjeru tangente na svaki dio trupa [3]. Otpor trenja brodocikla je povezan s trenjem podvodnog dijela brodocikla koji se giba kroz vodu i otporom zraka nadvodnog dijela brodocikla. Prilikom gibanja kroz vodu između površine trupa i vode dolazi do relativnog gibanje pri čemu se pojavljuju i tangencijalne sile otpora (u pravcu gibanja plovila i suprotnom smjeru) razmjerne pritisku vode na trup i koeficijentu trenja između oplata trupa i vode. Svaka neravnina na podvodnom dijelu oplata trupa povećava otpor brodocikla.

Gibanje brodocikla uzrokuje da se slojevi vode u njegovoj blizini kreću u istom pravcu kao i brodocikl. Specifični otpor po jedinici površine opada s povećanjem duljine ravne ploče te je W. Froude zaključio da prema stražnjem kraju ravne ploče voda poprima gibanje slično onom na prednjem dijelu ploče i stoga ima manju relativnu brzinu te je predložio sljedeću jednadžbu:

$$R_F = f \cdot S \cdot v^n \quad (3)$$

gdje je:

R_F – otpor trenja ravne ploče, N,

S - oplakana površina, m²,

v - brzina broda, m/s,

f - koeficijent otpora trenja ploče,

n - eksponent ovisan o duljini i hrapavosti ploče.

Otpor trenja ovisi o veličini, obliku i hrapavosti uronjenog dijela trupa. Koeficijent f i eksponent n u jednadžbi (3) ovise o duljini i hrapavosti površine. Također, ovisno o vrsti površine, vrijednost koeficijenta f opada porastom duljine ploče, dok pri zadanoj duljini raste povećanjem hrapavosti.

Međunarodna konferencija bazena za ispitivanje brodskih modela *ITTC (International Towing Tank Conference)* [4] usvojila je 1957. godine jednadžbu za određivanje koeficijenta otpora trenja kako slijedi:

$$C_F = \frac{0,075}{(\log_{10} Rn - 2)^2} \quad (4)$$

2.2.2. Otpor valova

Otpor valova je rezultanta djelovanja sila u smjeru normale na svaki dio trupa. Otpor lomljenja javlja se kod brodova s koeficijentom punoće $C_b > 0,8$ [5]. Otpor valova značajno se mijenja porastom brzine i promjenom oblika trupa. Također, pramac plovila iznimno je važan kod formiranja valova. Kod brzih brodova pojavljuje se komponenta otpora vodene prašine i vezana je uz utrošak energije potreban za generiranje vodene prašine.

Također, pri manjim brzinama, valovi koje formira brod su relativno mali tako da je udio otpora valova naspram viskoznog otpora zanemariv. Apscisa krivulje ukupnog otpora je Froudeov broj Fn , odnosno parametar koji izražava odnos inercijskih i gravitacijskih sila na sljedeći način:

$$Fn = \frac{v}{\sqrt{L \cdot g}} \quad (5)$$

gdje je:

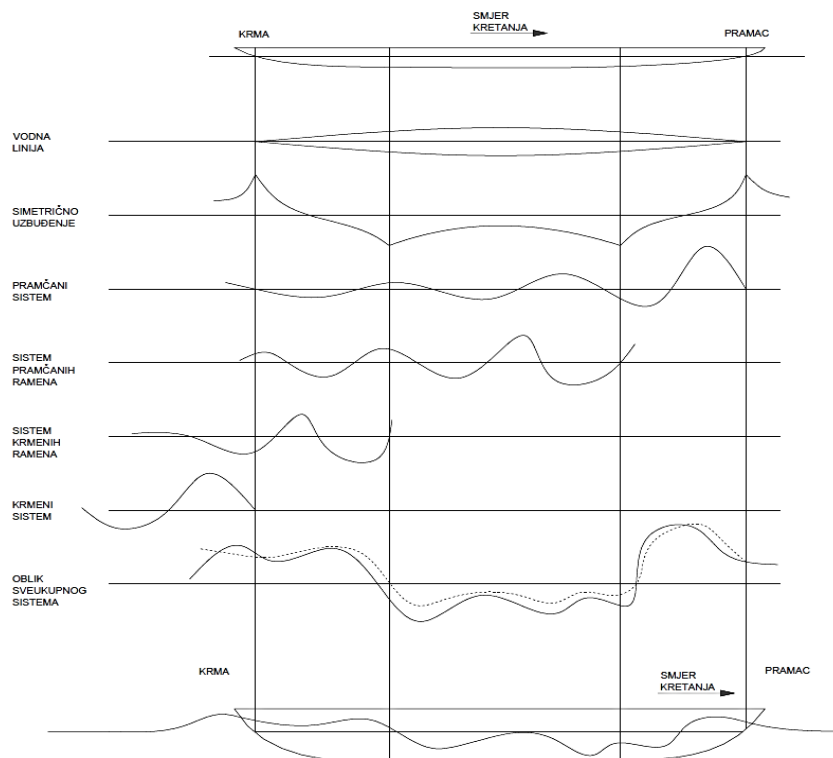
v - brzina broda, m/s,

L - duljina broda, m,

g – gravitacijsko ubrzanje, m/s².

2.2.2.1. Interferencija valova

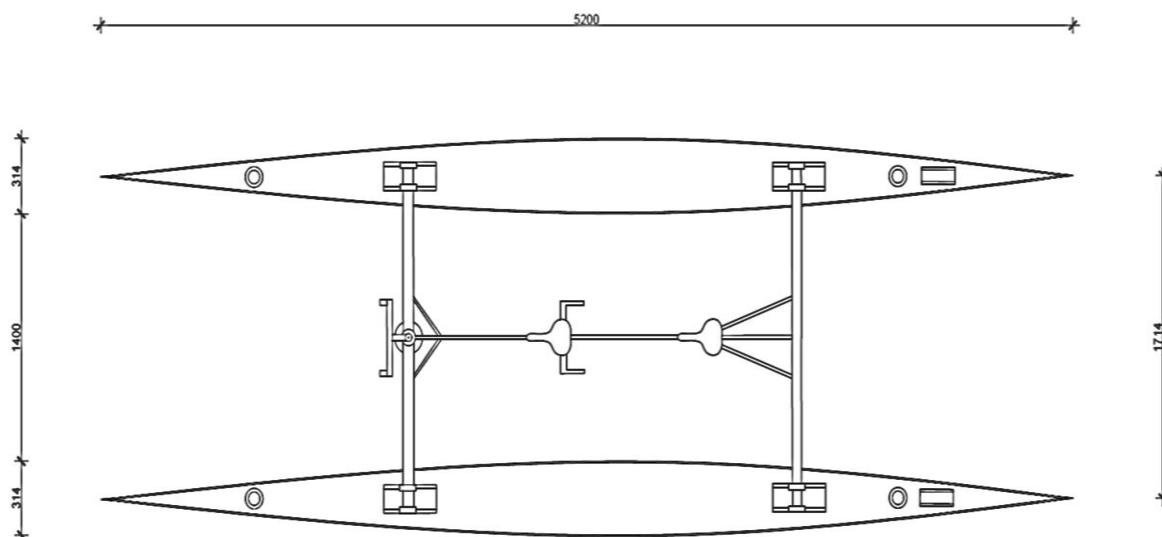
Problematika interferencije valova i njen utjecaj na otpor vrlo je zanimljiv kod plovila poput katamarana. Zbog povećane vitkosti trupova otpor valova višetrupnih brodova je manji no dolazi do povećanja otpora trenja zbog veće oplakane površine kao posljedice postojanja više trupova. Općenito se može reći kako je otpor višetrupnih brodova manji pri većim brzinama u odnosu na jednotrupne brodove zbog povoljne interferencije valova pri Froudeovim brojevima $Fn > 0,5$. Kada se govori o brodociklu, koji općenito postiže manje brzine, kao najveća komponenta ukupnog otpora do izražaja više dolazi otpor trenja nego otpor valova. Kod takvog plovila forme su vitkije pa je omjer duljine i širine veći što pozitivno utječe na brzinu plovidbe. Važno je napomenuti da se kod višetrupnih brodova jednostavnije može postići veći poprečni stabilitet, a samim time i veća sigurnost prilikom plovidbe [6]. Na Slici 1. prikazan je brodski sustav valova.



Slika 1. Sustav valova

2.3. Konfiguracija brodocikla

Brodocikl je plovilo pokretano isključivo ljudskom snagom, točnije snagom ljudskih mišića uglavnom proizvedenom nogama. Brodocikli najčešće imaju oblik jednotrupca sa širom ili užom formom trupa ili oblik katamarana. Brodocikl „Munja“, koji je predmet istraživanja ovog rada, specifičan je po tome što ima smješten pogon, odnosno vijak na simetrali između trupova na krmenom dijelu brodocikla. Kako se vidi na tlocrtu Slike 2. „Munja“ je katamaranske forme, trupova dugih 5,2 m na koje je pričvršćena aluminijska konstrukcija s položenim sjedalima za vozače te pogonska i upravljačka jedinica. Razmak između trupova brodocikla iznosi 1,7 m. Vozači su smješteni u simetrali broda, jedan iza drugoga te gledaju prema pramcu broda što je vidljivo na Slici 3. Ispred prednjeg vozača je upravljačka jedinica, odnosno volan kojim je omogućeno zakretanje pogonske jedinice i mijenjanje smjera plovidbe. Dakle, upravljačka pogonska jedinica azipodnog je tipa i smještena je na krmenom dijelu plovila, ali se njome upravlja s pramčanog dijela tako što se zaokretom volana rotira propulzijski uređaj te se, sukladno tomu, određuje smjer gibanja brodocikla. Kao propulzijski uređaj odabran je brodski vijak visokog stupnja korisnosti kojim se upravlja snagom ljudskih mišića.



Slika 2. Konfiguracija brodocikla



Slika 3. Brodocikl „Munja“

2.4. Katamaran

Katamaran je plovilo dobre poprečne stabilnosti pa se takva plovila često koriste u putničkom prijevozu zbog velikih brzina koje postižu. Sastoji se od dva trupa međusobno povezana palubom na koju se nastavlja nadgrađe. Katamaran je, dakle, dvotrupno plovilo za koje je specifičan manji otpor valova zbog vitkosti njegovih trupova. Međutim, kao posljedica postojanja više trupova, tj. zbog veće oplakane površine, dolazi do povećanja otpora trenja. Isto tako, važno je imati na umu da svaki trup višetrupnog plovila generira svoj valni sustav što utječe na ukupni otpor plovila. To se odnosi na otpor interferencije valova između dva trupa, odnosno valnih sustava koji posjeduju iste komponente otpora kao i brodovi koji imaju jedan trup, a dolaskom u kontakt utječu na ukupni otpor plovila. Kada se govori o „Munji“ u kontekstu katamarana, važno je istaknuti njezinu specifičnost koja se očituje u svojstvu natjecateljskog plovila te je u tom smislu važno brinuti o težini konstrukcije, što znači da je potrebno raspolagati što manjom težinom jer je ista povezana s gazom brodocikla, a ako je vrijednost gaza manja, manji će biti i otpor koji je direktno povezan s veličinom oplakane površine.

2.5. Kormilo

Općenito, u funkcionalnom smislu, kormilo služi za upravljanje brodom, tj. ono je sredstvo koje osigurava svojstvo upravljivosti broda. U strukturnom smislu, kormilo je strukturni izdanak izvan trupa broda, obično na krmi i ne sudjeluje u strukturi broda, ali mora imati konstrukciju koja zadovoljava zahtjeve funkcije i opterećenja, a pričvršćenje kormila za trup mora biti sigurno. Težina kormila se mora prenijeti preko nosača postavljenih na gornjem kraju kormila, a struktura trupa mora biti ojačana u području preuzimanja težine kormila. Na kormilo djeluju sile koje nastaju prilikom upravljanja broda, kada mlaz vode nailazi na površinu kormila u otklonjenom položaju. Poprečne sile koje nastaju pri upravljanju kormilom djeluju približno okomito na površinu kormila. Osim toga, kormilo je izloženo i uvijanju. Na kormilo djeluju i dinamička opterećenja zbog udara valova na površinu kormila.

Otpor izdanaka (skrokovi, nogavice, osovinski vodovi, kobilice, kormila i dr.) uglavnom je viskoznog porijekla. Ti su dijelovi trupa redovito dosta udaljeni od slobodne površine pa je njihov otpor relativno malen. Izdanci, kao što su bočne kobilice, veće duljine, male debljine i postavljeni u tok strujnica uzduž broskog trupa, imaju izraženiji otpor trenja. Otpor izdanaka određuje se ispitivanjem modela. Za približne promjene mogu poslužiti

statistički podaci za pojedine tipove brodova koji se najčešće daju u postocima golog trupa [3].

Brodocikl „Munja“, koji je prema tipu plovila katamaran, ima jedno kormilo smješteno između trupova. Pretpostavka je da kod „Munje“ postoji mogućnost da kormilo samo za sebe stvara preveliki otpor u odnosu na ukupni otpor brodocikla te će se sukladno toj pretpostavci, otpor brodocikla ispitati kroz vožnje sa i bez kormila.

3. PLANIRANJE POKUSA

Kao što je vidljivo iz uvodnog dijela rada, svrha ovog rada je odrediti otpor brodocikla kao i snagu otpora brodocikla. Da bi se odredio otpor brodocikla, potrebno je provesti eksperiment. Prvenstveno je, u svrhu eksperimentalnog postupka, bilo potrebno pribaviti opremu te uređaje potrebne za kvalitetno izvođenje eksperimenta te osigurati prostor, odnosno lokaciju na kojoj bi se isti mogao provesti.

3.1. Predviđeni otpor, gaz i brzina

Na temelju dosadašnjih ispitivanja i iskustava stečenih sudjelovanjem na raznim sveučilišnim i međunarodnim natjecanjima s brodociklom na ljudski pogon, a koji je korišten u svrhu pokusa ovog završnog rada, ustanovljeno je da je plovna brzina brodocikla oko 10 čv. Također, poznato je da je prosječna ljudska snaga na nožni pogon oko 600 W po čovjeku, što odgovara ukupnoj snazi od 1200 W s obzirom na to da brodociklom upravljaju dva čovjeka. Tom snagom potrebno je savladati snagu otpora brodocikla. Dakle, otpor broda jednak je efektivnoj snazi podijeljenoj s brzinom broda kako slijedi:

$$R_T = \frac{P_E}{v} \quad (6)$$

Da bi se ta snaga savladala u potpunosti, odnosno da bi se zadržala konstantna brzina, snaga ljudskog pogona mora biti jednaka snazi otpora broda pomnožena s koeficijentima gubitaka.

$$P_E = \frac{2 \cdot P_N}{\eta_0 \cdot \eta_H \cdot \eta_R \cdot \eta_M} \quad (7)$$

gdje je:

P_N – prosječna snaga čovjeka, W,

η_0 – stupanj djelovanja vijka u slobodnoj vožnji,

η_H – stupanj utjecaja trupa,

η_R – koeficijent prijelaza,

η_M – koeficijent mehaničkih gubitaka.

Budući da točne vrijednosti koeficijenata nisu poznate, može se pretpostaviti da je njihov umnožak jednak približno jedan:

$$\eta_O \cdot \eta_H \cdot \eta_R \cdot \eta_M \approx 1 \quad (8)$$

Na taj način moguće je procijeniti mjerni raspod potrebnog dinamometra. S tom pretpostavkom možemo reći kako je efektivna snaga P_E jednaka umnošku ljudskih snaga što je vidljivo iz sljedeće jednadžbe:

$$P_E = 2 \cdot P_N \quad (9)$$

Na temelju jednadžbe (6) konačno se može pretpostaviti otpor brodocikla s obzirom da su poznate sve pretpostavljene vrijednosti potrebne za određivanje približne vrijednosti sile otpora brodocikla.

$$R_T = \frac{1200}{0,5144 \cdot 10} = 233,28 \text{ N} \quad (10)$$

Na temelju navedenih pretpostavki može se zaključiti da će sila otpora brodocikla biti u intervalu od 200 do 250 N i s obzirom na te vrijednosti moguće je procijeniti koji dinamometar odabrati što znači da će se koristiti onaj s minimalnim vrijednostima mjerne sile od 300 N. Međutim, zbog sigurnosti korišten je profesionalni dinamometar s maksimalnom vrijednošću od 1000 N i tolerancijom od $\pm 0,2$ N ustupljenim od strane Laboratorija za eksperimentalnu mehaniku Fakulteta strojarstva i brodogradnje. Za pokusnu plovidbu teglja brodocikla koristit će se dinamometar manje kvalitete i većeg odstupanja, dok će se profesionalni dinamometar koristiti nakon što se utvrdi način na koji će se tegliti brodocikl brodom za tegljenje, prvenstveno radi sigurnosnih razloga kako se profesionalni dinamometar tijekom izvođenja pokusa ne bi oštetio, a u svrhu što preciznijeg mjerenja.

Gaz brodocikla je pretpostavljen oko 15-20 cm. Prema Arhimedovu zakonu sila uzgona uronjenog tijela je jednaka umnošku volumena istisnine, ubrzanje zemljine sile teže i gustoće tekućine što je vidljivo iz sljedeće jednadžbe:

$$U = V \cdot g \cdot \rho_0 \quad (11)$$

gdje je:

U – sila uzgona, N,

ρ_0 – gustoća tekućine, kg/m³.

Nadalje, težina brodocikla je jednaka uzgonu pomoću kojeg je moguće odrediti gaz brodocikla. Pretpostavka je da je masa ukupnog brodocikla suma svih pojedinačnih masa. Masa brodocikla se sastoji od sume ukupnih masa konstrukcije i masa ljudi koji upravljaju istim:

$$m_{\text{brodocikl}} = m_{N1} + m_{N2} + m_{OKVIR} + m_{TRUPOVI} \quad (12)$$

gdje je:

m_{N1} – masa vozača 1, kg,

m_{N2} – masa vozača 2, kg,

m_{OKVIR} – masa okvira, kg,

$m_{TRUPOVI}$ – masa trupova, kg.

Težina brodocikla je jednaka umnošku mase brodocikla i ubrzanja zemljine sile teže te je njezina vrijednost približno poznata. Također, težina brodocikla mora biti jednaka uzgonu kako slijedi:

$$U = D \quad (13)$$

gdje je:

D – ukupna težina, N.

Na temelju pretpostavljene mase vozača brodocikla, izračunat je pretpostavljeni gaz vidljiv u Tablici 1.

Tablica 1. Izračun ukupne mase, gaza i istisnine

čovjek	90	kg
rama	30	kg
trup	12	kg
cijeli brod	234	kg
G	2296	N
ρ_o	1000,5	kg/m ³
g	9,81	m/s ²
istisnina	0,234	m ³
gaz	0,163	m

3.2. Oprema

Za provođenje pokusa potrebna je sljedeća oprema: dva dinamometra, plovno uže minimalne duljine 40 m te uređaj za mjerenje brzine (Global Positioning System - GPS). Također, potreban je i brod za vuču brodocikla kako bi pokus bio kvalitetno izveden.

3.3. Način provođenja pokusa

Pokus, tj. tegljenje plovila će biti izvedeno tako da će se sudačkim katamaranom tegliti brodocikl. Na katamaran će se prethodno instalirati konstrukcija koja se sastoji od drvene letve učvršćene na katamaran te će se na nju spojiti dinamometar kojim će se očitavati vrijednosti sile otpora pri različitim brzinama. Drugi kraj dinamometra biti će spojen na konop pušten oko 25 metara nakon vučnog broda te će se vezati na pramčani dio brodocikla kao što je vidljivo na Slici 4.



Slika 4. Provođenje pokusa tegljenja s brodociklom

3.4. Način postavljanja brodocikla na predvideni gaz

Brodocikl ima samo uzdužne vodilice i zbog toga se težište mase brodocikla može pomicati samo uzdužno. Težište mase određuje se izborom mase težeg ili lakšeg vozača. Na Slici 5. prikazana je centracija okvira brodocikla. Trupovi se centriraju tako da je razmak jednak s obje strane, a izmjereni razmak iznosi 74,5 cm. Da bi se provjerilo jesu li trupovi postavljeni paralelno, potrebno je izvršiti mjerenje dijagonala trupova brodocikla što je prikazano na Slici 6.



Slika 5. Centracija trupova brodocikla



Slika 6. Mjerenje dijagonala trupova

3.5. Lokacija

Idealna lokacija za provedbu pokusa bila bi jedno od zagrebačkih jezera, stoga je upućen zahtjev Poslovnoj jedinici Jarun-Bundek koja upravlja Rekreativno – športskim centrom Jarun i Športsko rekreacijskim centrom Bundek budući da raspolažu vodenim površinama koje bi bile prikladne za izvođenje pokusa. Primjerice, vodena površina Rekreativno-športskog centar Jarun raspolaže regatnom stazom dugom 2250 m i dvama jezerima (Veliko i Malo jezero) te udovoljava potrebama sportaša i rekreativaca. Na regatnoj stazi održavaju se natjecanja veslača, kajakaša i kanuista, dok na Velikom jezeru svoje športske aktivnosti obavljaju klubovi jedriličara i jedrenja na dasci. Na temelju ovih poznatih činjenica, idealna lokacija planiranja pokusa jedno je od jezera RŠC Jarun prikazano na Slici 7.



Slika 7. Lokacija provedbe pokusa – Jarunsko jezero

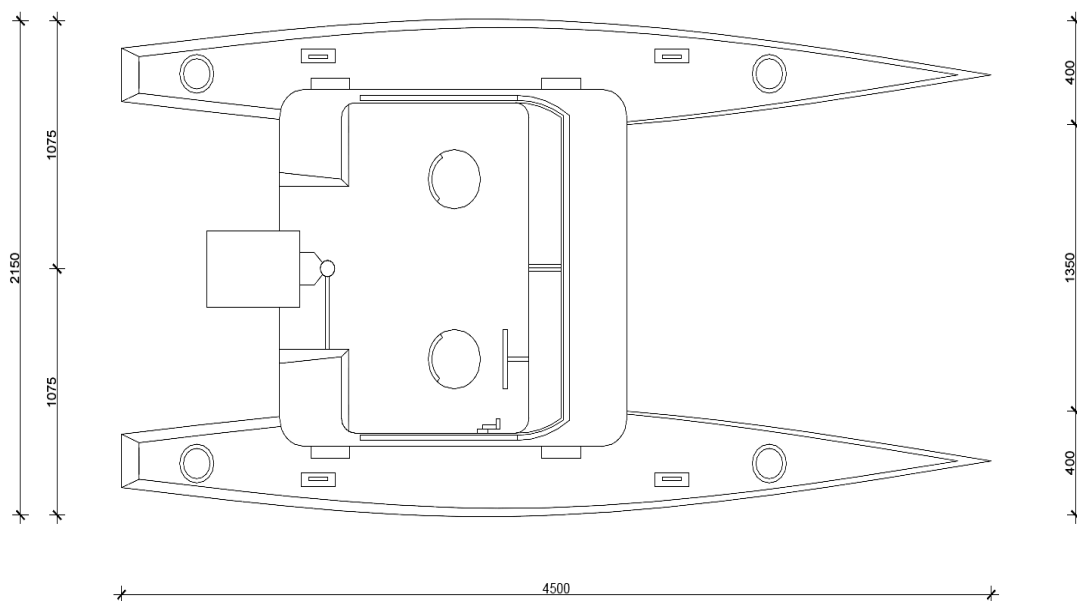
4. PROVEDBA POKUSA

4.1. Konfiguracija opreme

Sukladno planiranim potrebama, za provedbu navedenog pokusa korišten je sudački brod za vuču, dva dinamometra, dva GPS uređaja za mjerenje brzine i užice za vuču. Također, sastavljena je konstrukcija instalirana na sudački brod koja se sastoji od drvene letve, graničnika, metalne šipke te od nekoliko karabinera za učvršćivanje kojima su se odvajali, odnosno, spajali brod za vuču i brodocikl.

4.1.1. Brod za vuču i specifikacije

U svrhu provedbe pokusa otpora brodocikla Veslački klub Jarun ustupio je na privremeno korištenje svoj sudački brod (katamaran) za praćenje čamaca na natjecanjima veslača. Glavne karakteristike katamarana su maksimalna brzina od 15 čvorova, duljina od 4,5 metara te dvotaktni vanbrodski benzinski motor od 25 KS marke Tohatsu što je dovoljno za postizanje pretpostavljene plovne brzine brodocikla. Na Slici 8. prikazan je navedeni katamaran kao idealno rješenje za izvođenje ovoga pokusa prvenstveno zbog svojih vitkih trupova minimalnog otpora te stvaranja manjih valova prilikom vuče manjeg plovila. Na Slici 9. prikazan je brod za vuču u realnom stanju.



Slika 8. Prikaz broda za vuču



Slika 9. Brod za vuču

4.1.2. Dinamometar

4.1.2.1. Dinamometar 1

Dinamometar 1 korišten je samo za prvu probnu vožnju prvenstveno kako bi približan otpor brodocikla bio poznat te zbog sigurnosnih razloga obzirom na to da način tegljenja plovila prikladnim motornim čamcem još nije konačno utvrđen.



Slika 10. Dinamometar 1

Korišteni dinamometar 1 prikazan na Slici 10. nije potpuno primjeren za profesionalnu upotrebu te je njegova najveća vrijednost očitavanja mase 50 kg što odgovara sili od 490 N. Pretpostavljena greška u toleranciji dinamometra 1 iznosi $\pm 0,5\text{kg}$. Dinamometar 1 može očitavati samo vlačnu silu.

4.1.2.2. Dinamometar 2

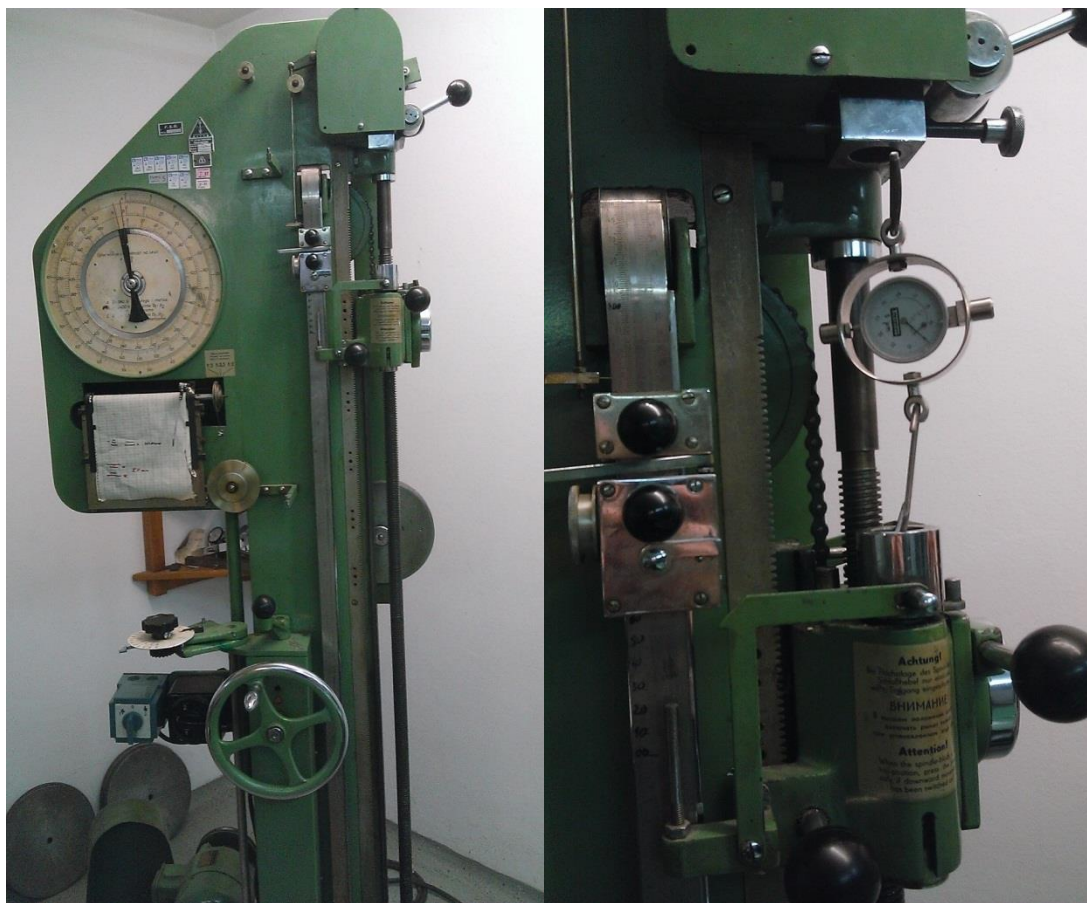
Profesionalni dinamometar prikazan na Slici 11. ustupljen je od strane Laboratorija za eksperimentalna mehaniku Fakulteta strojarstva i brodogradnje i korišten je nakon što je utvrđen sigurnosni način vuče brodocikla brodom za vuču kroz vodu nakon probnih vožnji s dinamometrom 1. Dinamometar 2 ima mogućnost očitavanja maksimalne sile od 1000 N s točnošću očitavanja skale od $\pm 0,25\text{ N}$ te za razliku od dinamometra 1 može očitavati i vlačnu i tlačnu silu. Skala vlačne sile, kao i vrijednosti baždarenja dinamometra 2, prikazana je u Tablici 2. Pri baždarenju dinamometra 2 očitavane su vrijednosti do 300 N zbog toga što kod eksperimentalnog mjerenja sile nisu prelazile tu vrijednost. Dinamometar 2 baždaren je u Laboratoriju za eksperimentalnu mehaniku na Fakultetu strojarstva i brodogradnje prije i nakon pokusa što je prikazano na Slici 12.



Slika 11. Dinamometar 2

Tablica 2. Skala vlačne sile dinamometra 2

Sila (N)	Skala vlačne sile	Baždarenje I.	Baždarenje II.
0	0	0	0
100	31,4	31,2	31,6
200	62,7	62,0	63,4
300	93,9	94,3	93,5



Slika 12. Baždarenje dinamometra

4.1.3. Uže za tegljenje

Prilikom izrade pokusa korišteno je 6-mm tronitno višenamjensko plutajuće uže plave boje koje ne upija vodu sa svojstvima zadržavanja mekane fleksibilnosti te karakterističnog rastezanja ne većeg od 10 %. Uže za tegljenje je sastavljeno od polipropilenskog viševlaknastog materijala, termički je učvršćeno, a prekidna snaga mu iznosi 590 kg. Na Slici 13. prikazano je uže za tegljenje korišteno u pokusu.



Slika 13. Uže za tegljenje

4.1.4. GPS uređaji za mjerenje brzine

Prilikom izvođenja ovog pokusa bilo je potrebno izmjeriti brzinu brodocikla s obzirom na to da se sukladno promjenama trenutnih brzina mijenja otpor brodocikla. Prvotna je namjera bila očitavati brzinu preko udaljenosti između bova postavljenih na lokacijskom jezeru koje služe kao orijentacijski motiv natjecateljskim brodovima. Međutim, za mjerenje brzine brodocikla ipak su korišteni mobilni uređaji s instaliranim GPS aplikacijama pomoću kojih su očitavane trenutne vrijednosti. Taj način očitavanja brzine bio je najprikladniji i najpristupačniji. Korišteni su sljedeći mobilni uređaji: HTC Windows Phone 8S i Samsung Galaxy S3 te aplikacija Sports Tracker.

4.2. Predradnje za provođenje pokusa

Predradnje eksperimentalnog ispitivanja bile su transport potrebne opreme, alata i brodocikla iz prostorija Fakulteta, tj. HUSB-a na potvrđenu lokaciju, odnosno Jarunsko jezero koje se na temelju poznatih činjenica iz dijela planiranja pokusa činilo kao idealnom lokacijom. Također, bilo je potrebno sastaviti brodocikl te potom izvršiti odgovarajuću centraciju brodocikla. Nadalje, bilo je važno razmotriti i utvrditi način tegljenja plovila, odnosno izraditi konstrukciju za tegljenje brodocikla koja će biti instalirana na krmeni dio broda za tegljenje te je izrađena konstrukcija za tegljenje. Također, bilo je važno izraditi vez

brodocikla za uže. Isto tako bilo je potrebno provesti baždarenje dinamometra 1 i dinamometra 2, odnosno dovesti ih na nultu vrijednost. Nadalje, očitavana je i gustoća vode aerometrom kojim su očitane vrijednosti gustoće od $1000,5 \text{ kg/m}^3$ pri $15 \text{ }^\circ\text{C}$. Nakon osiguravanja svih potrebnih i zadovoljavajućih uvjeta, izvršeno je porinuće brodocikla u vodu. Isto tako, predradnje ovog pokusa zahtijevale su aktivnost minimalno pet osoba od kojih bi dvije osobe bile na brodociklu i opteretile ga masom kako bi proračun otpora brodocikla bio dosljedan, jedna bi osoba upravljala brodom za vuču, jedna bi osoba bila zapisničar koja na brodu za vuču očitava vrijednosti sile otpora na dinamometru, dok bi na obali barem dvije osobe morale brinuti o privezu te o dokumentiranju pokusa fotografiranjem i snimanjem. Prikaz sudionika pokusa i njihovih funkcija vidljiv je u Tablici 3.

Tablica 3. Prikaz funkcija sudionika pokusa

Posada	Funkcija
Ivan Munić	Mentor, sastavljač, probni vozač brodocikla
Ivan Lončar	Voditelj eksperimenta, sastavljač, zapisničar
Hrvoje Brečić	Glavni asistent, probni vozač brodocikla, sastavljač
Hana Tudor	Vozač brodocikla (upravljačko mjesto, sve vožnje)
Ivan Fatović	Vozač brodocikla (3. i 4. vožnja s kormilom, kormilarsko mjesto), fotograf
Juraj Trogrlić	Probni vozač brodocikla i sastavljač
Stanislaw Ćosić	Probni vozač, sastavljač
Marin Duboković	Vozač brodocikla (nulta, prva i druga vožnja), sastavljač
Tomislav Prosinečki	Sastavljač
Deni Vlašić	Vanjski suradnik
Bruno Haraminčić	Glavni asistent, kormilar i sastavljač

4.2.1. Mjerenje gazova

U predradnje pokusa spada i mjerenje gazova brodocikla, jer veličina oplakane površine utječe na otpor. Način mjerenja gazova brodocikla prikazan je na Slici 14. Dobivene vrijednosti mjerenja prikazane su u Tablici 4. i odnose se isključivo na probnu, nultu te prvu i drugu vožnju prilikom kojih nije korišteno kormilo. Pretpostavka je kako će se vrijednosti gaza nakon instalacije kormila najvjerojatnije povećati, stoga je potrebno voditi računa da treća i četvrta vožnja budu izvedene pri sličnim uvjetima, odnosno s približnom masom i pri istim gazovima. U tom smislu, u vidu treba imati i mogućnost zamjene vozača brodocikla u

dvjema posljednjim vožnjama pod pretpostavkom da su vozači manje mase, tj. da ukupna masa brodocikla u vožnji s kormilom bude slična ili jednaka ukupnoj masi brodocikla u prethodnim vožnjama bez kormila.

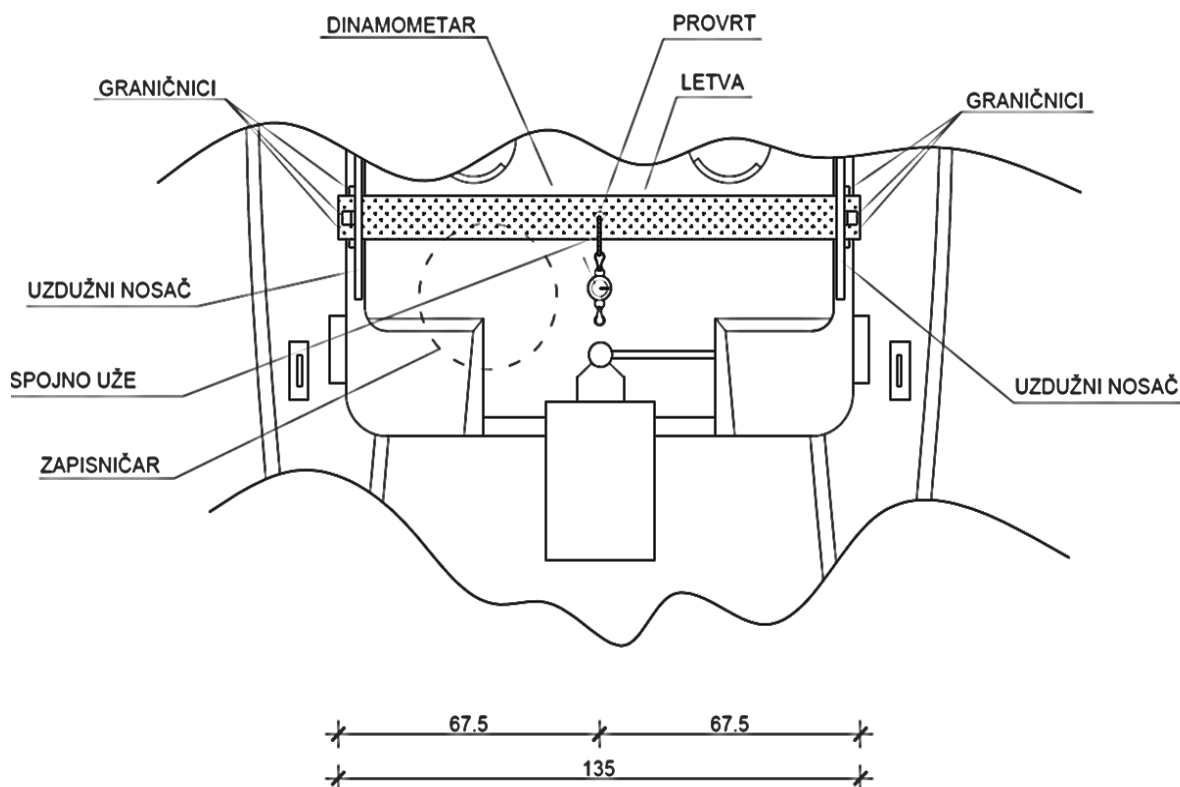


Slika 14. Mjerenje gazova brodocikla

Tablica 4. Vrijednosti gazova za probnu, nultu, prvu i drugu vožnju

	Gaz - pramac	Gaz - krma
Desni trup	105 mm	70 mm
Lijevi trup	95 mm	85 mm

4.2.2. Izrada konstrukcije

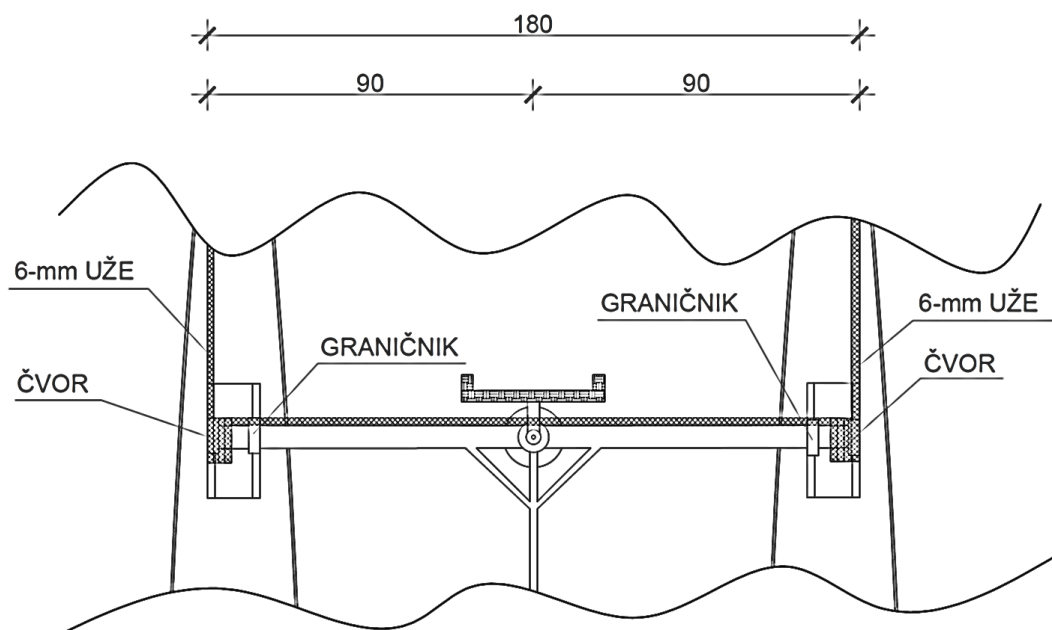


Slika 15. Konstrukcija povlačenja plovila

Sukladno planiranju pokusa tegljenju plovila, izrađena je konstrukcija instalirana na brod za tegljenje prikazana na Slici 15. Konstrukcija je sastavljena tako da je drvena letva dimenzija 135 x 5 x 2,5 cm postavljena između uzdužnih palubnih nosača, čija je uloga osigurati prihvat tijekom vožnje. Translacijski pomak letve u sve tri osi blokiran je graničnicima učvršćenima za letvu. Na uzdužnoj simetrali letve izbušen je provrt promjera 10 mm kroz koji je potom provučeno užje promjera 6 mm i vezano u čvor. Na drugi kraj užeta spojen je jedan karabiner koji ujedno služi kao točka odvajanja brodocikla od broda za vuču. Neposredno nakon karabinera instaliran je dinamometar kojim se očitavaju vrijednosti sile otpora, dok se na njega dalje nastavlja užje vezano za zakretnu letvu. Na svaki kraj zakretne letve vezano je užje koje je spojeno na pramčani dio brodocikla. Prikaz vezanja užeta za brodocikl prikazan je na Slici 16.

4.2.2.1. Vezanje užeta za brodocikl

Brodocikl je vezan užetom tako što je na pramčani dio brodocikla užje vezano na krajeve poprečne grede koja spaja trupove na način da je na svakom kraju izrađen višestruki čvor što je vidljivo na Slici 16.



Slika 16. Prikaz vezanja užeta za brodocikl

4.2.2.2. Centracija užeta

Kod izvođenja pokusa bilo je bitno postići jednaku duljinu obiju strana užeta sa svrhom da vlačne sile u užetu tijekom tegljenja budu jednake, tj. provesti centriranje užeta. Obje strane konopa su duljine 23,86 m, a na Slici 17. je prikazan način mjerenja duljine užeta.



Slika 17. Način centracije užeta

4.3. Pokus

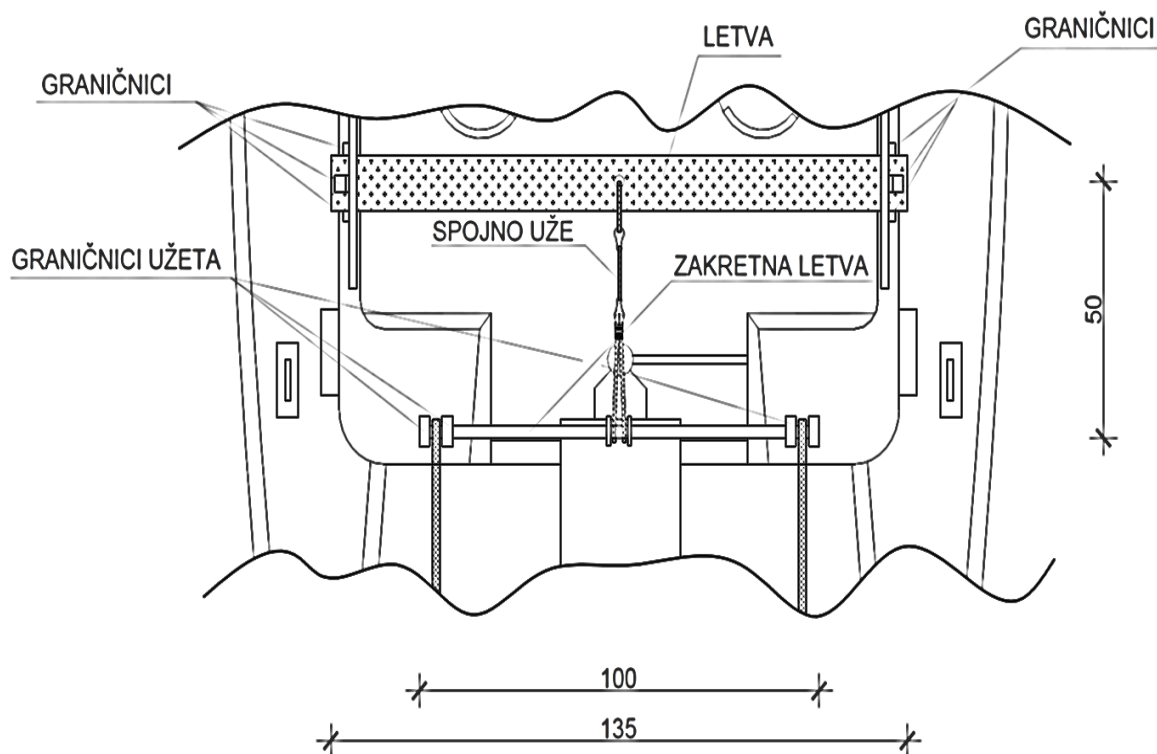
Pokus je izveden na Jarunskom jezeru u trajanju od šest dana te ga je bilo potrebno izvoditi na mirnoj vodenoj površini tijekom pogodnih vremenskih uvjeta. Kako bi se otpor

plovila na ljudski pogon, tj. brodocikla eksperimentalno odredio, bilo je potrebno provesti nekoliko vožnji na duljini 2250 m regatne staze lokacijskog jezera. Ukupno je izvedeno šest vožnji u smjeru jug-sjever po regatnoj stazi Jarunskog jezera koje su bile podijeljene u nekoliko kategorija: probna vožnja i nulta vožnja kojom su utvrđeni uvjeti i način izvođenja narednih vožnji tegljenja brodocikla brodom za vuču te dvije vožnje trupova bez kormila i dvije vožnje trupova s kormilom. Tijekom svake vožnje zapisničar je očitavao rezultate tako što je nakon ustaljene brzine na GPS aplikacijama s dinamometrom, u vožnjama gdje je korišten, očitavana vrijednost sile otpora brodocikla. Rezultati vožnji povlačenja plovila bit će prikazani u idućem poglavlju kod analize rezultata, dok će u idućim poglavljima detaljno biti opisan pokus.

4.3.1. Probna vožnja

Cilj izvođenja probne vožnje je utvrđivanje uvjeta i načina izvođenja narednih vožnji tegljenja brodocikla brodom na što pouzdaniji način. Nakon obavljenih svih potrebnih predradnji, sastavljena je konstrukcija od koje se očekivalo da će najbolje pokazati ispravan način vuče brodocikla brodom za tegljenje i koja je opisana u prethodnim poglavljima. Važno je napomenuti kako u probnoj vožnji nije korišten dinamometar, već je umjesto dinamometra korišteno spojno uže. Tako sastavljenom konstrukcijom provedeno je nekoliko vožnji na Jarunskom jezeru kako bi se utvrdilo da je li ovakav način teglja plovila siguran, te je zaključeno da brodocikl prati smjer gibanja broda za tegljenje.

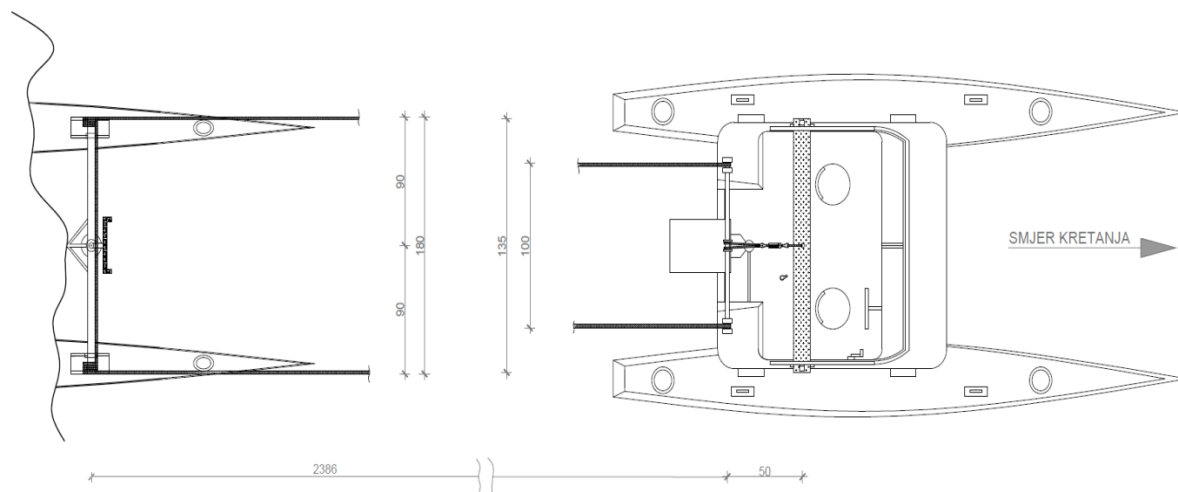
Ovako sastavljena konstrukcija prikazana na Slici 18. pokazala se dobrom kod izvođenja probne vožnje, stoga je korištena kao primjer izvođenja nulte te narednih četiriju vožnji brodocikla, ali uz upotrebu dinamometra. Međutim, kao nedostatak ove konstrukcije pokazala se zakretna letva zbog koje je prilikom pojave većih valova došlo do gubitka upravljivosti brodocikla, odnosno brodocikl nije pratio smjer gibanja broda za tegljenje.



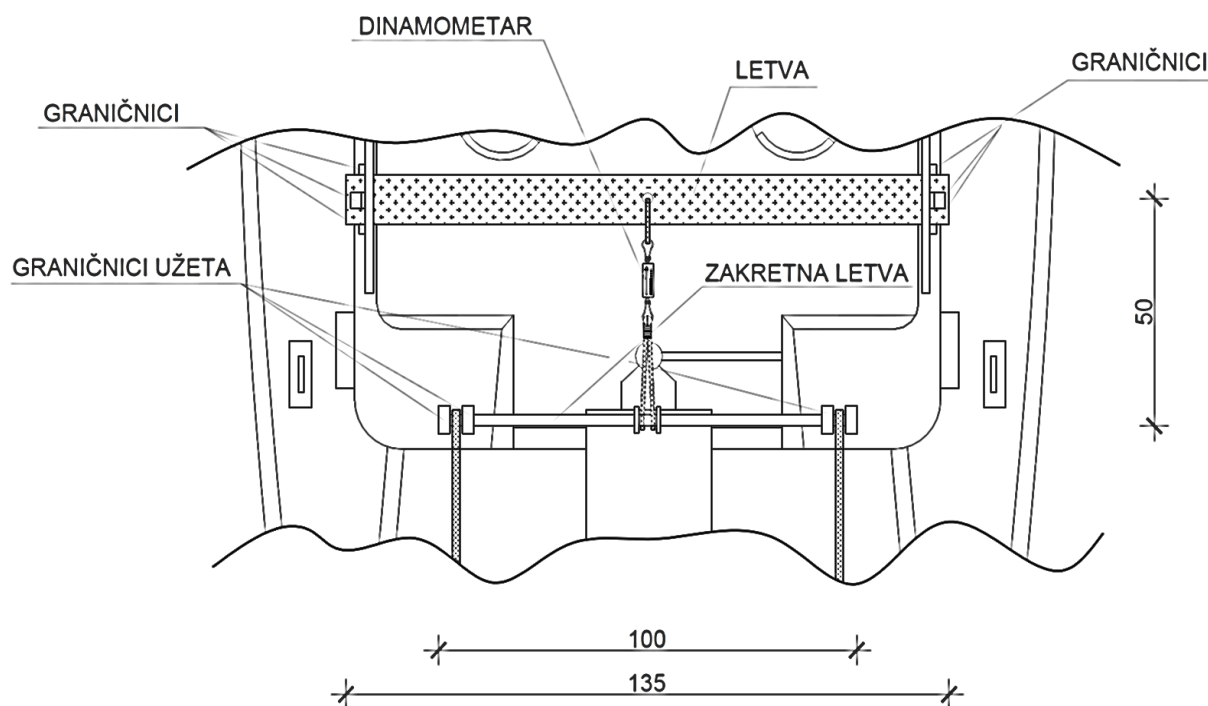
Slika 18. Način tegljenja brodocikla brodom za tegljenje (probna vožnja)

4.3.2. Nulta vožnja

Kod nulte vožnje, isključivo zbog sigurnosnih razloga, odnosno mogućih oštećenja, korišten je dinamometar 1 u svrhu utvrđivanja vrijednosti sile otpora. Brodocikl je tegljen brodom za tegljenje prilikom čega su očitavane vrijednosti sile otpora brodocikla. Analiza rezultata nulte vožnje neće biti uzeta u obzir kod ukupnog proračuna otpora broda ovog pokusa, već služi iznimno u svrhu određivanja približne vrijednosti sile otpora. Na Slici 19. prikazan je način tegljenja brodocikla, a na Slici 20. prikazana je konstrukcija tegljenja prilikom nulte vožnje.



Slika 19. Način tegljenja kod nulte vožnje

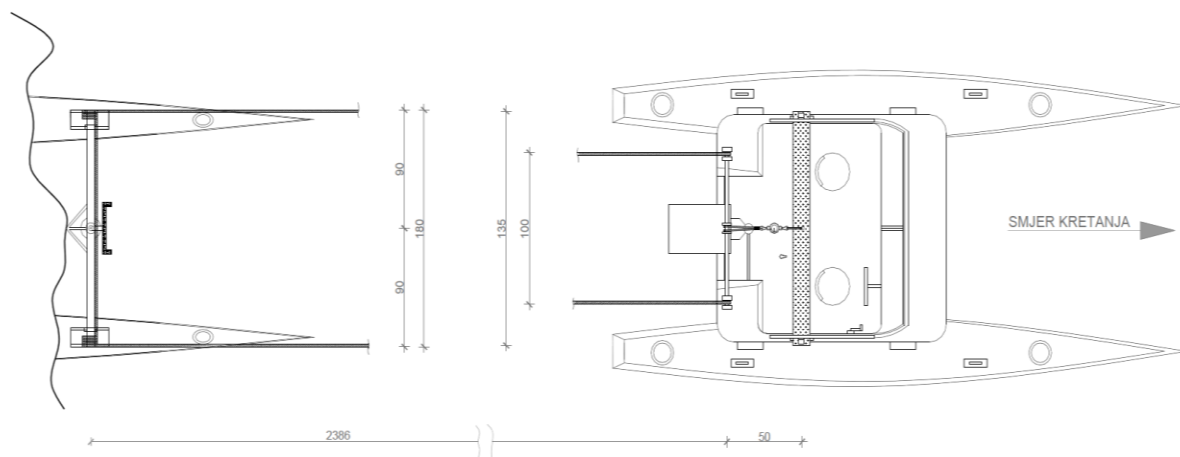


Slika 20. Konstrukcija veza kod nulte vožnje

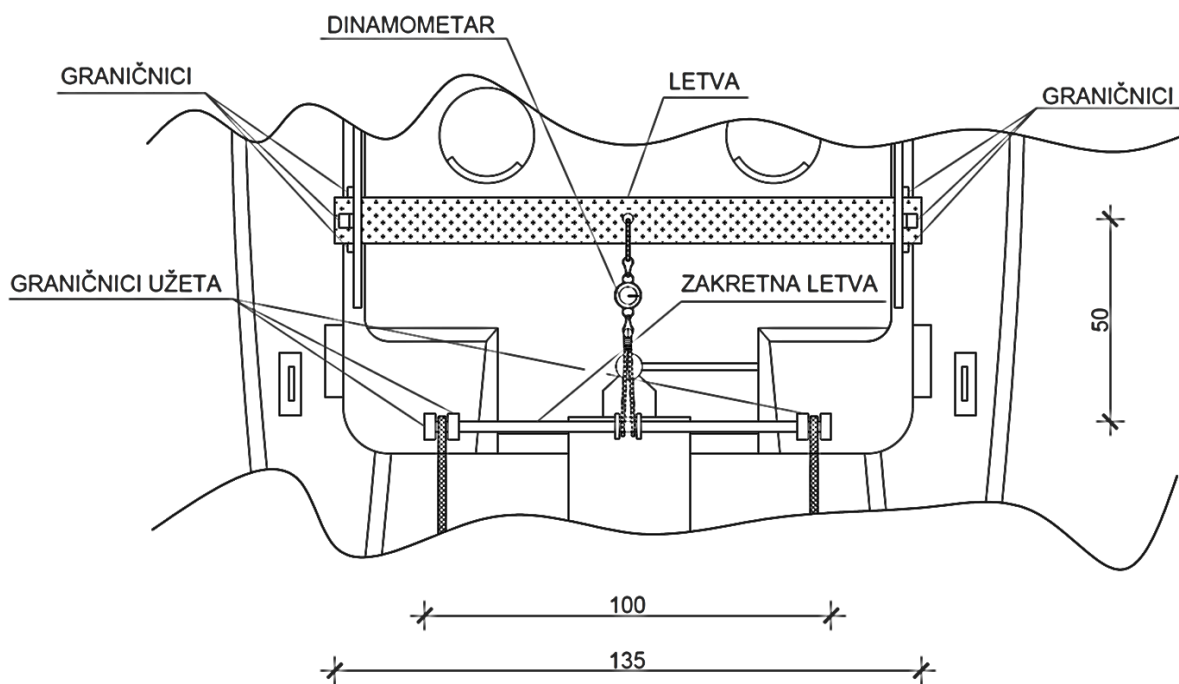
4.3.3. Prva vožnja

Nakon provedene probne i nulte vožnje na kojima je ustanovljeno kako konstrukcija i način veza broda za tegljenje s brodociklom zadovoljava optimalne uvjete kao preduvjet kvalitetnog tegljenja plovila, započeta je prva vožnja tijekom koje je u obzir uzet samo otpor trupova brodocikla gdje kormilo ne čini dio cjelokupne konstrukcije te uopće ne sudjeluje u otporu brodocikla. Po ustaljenju brzine očitavane preko GPS uređaja, očitane su vrijednosti

sile otpora za pojedine brzine. Važno je napomenuti kako je u prvoj vožnji, kao i u svim narednim vožnjama, korišten dinamometar 2 s ciljem što preciznijeg očitavanja vrijednosti sile otpora obzirom na to da je u prijašnjim vožnjama utvrđeno kako je takav način tegljenja siguran te da brodocikl prati smjer gibanja broda za tegljenje. Na Slici 21. prikazan je način tegljenja brodocikla, a na Slici 22. prikazana je konstrukcija tegljenja prilikom prve vožnje.



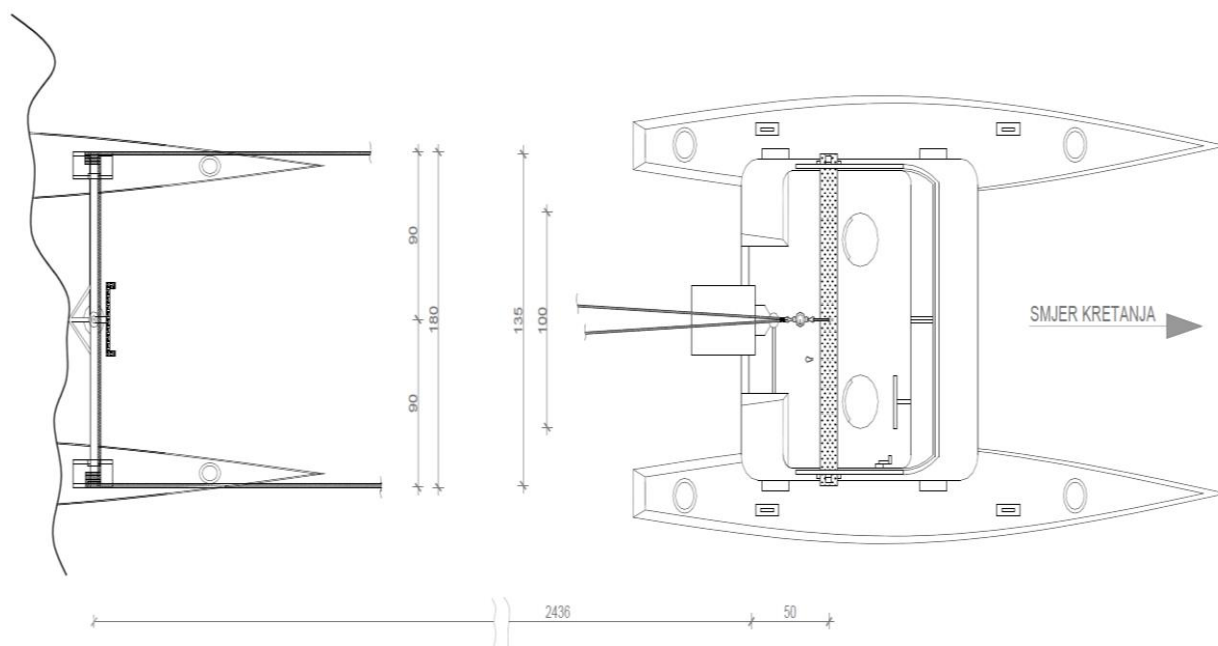
Slika 21. Način tegljenja kod prve vožnje



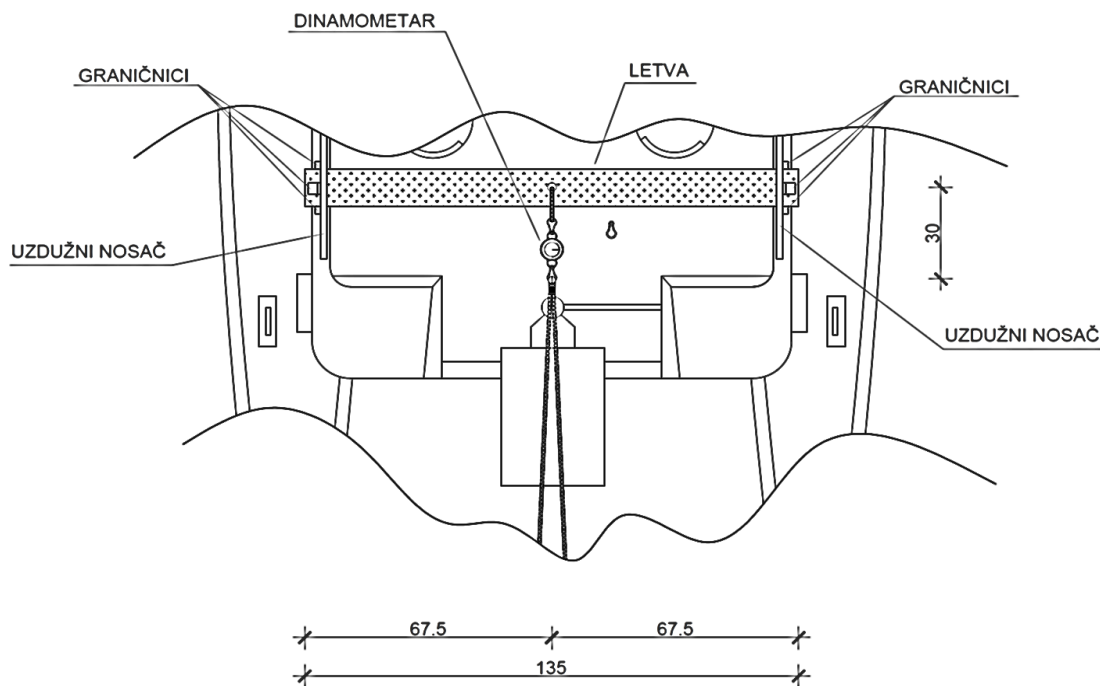
Slika 22. Konstrukcija veza kod prve vožnje

4.3.3.1. Promjena konstrukcije i veza

Pri povratnoj vožnji prema obali, uočeno je da daljnjim povećanjem brzine brodocikl ne prati kurs broda za tegljenje čemu je uzrok pronađen u načinu vezanja brodocikla za brod za tegljenje. Sukladno tomu, zaključeno je kako je za naredne vožnje potrebno promijeniti način vezanja brodocikla za brod za tegljenje. Nakon uočene nepravilnosti, instalacija zakretne letve je uklonjena te je uže spojeno izravno u čvorni V-spoj. Prije toga postupka, također je izvršena centracija užeta, stoga je duljina svake strane konopa sada 24,36 m. Sukladno tomu, provedeno je nekoliko vožnji bez dinamometra i zaključeno da je ovakav način veza kvalitetnije rješenje koje će biti korišteno u ostalim vožnjama, tj. drugoj, trećoj i četvrtoj vožnji. U idućim vožnjama bit će korištena konstrukcija prikazana na Slici 23., a način veza prikazan na Slici 24.



Slika 23. Način tegljenja brodocikla kod druge, treće i četvrte vožnje



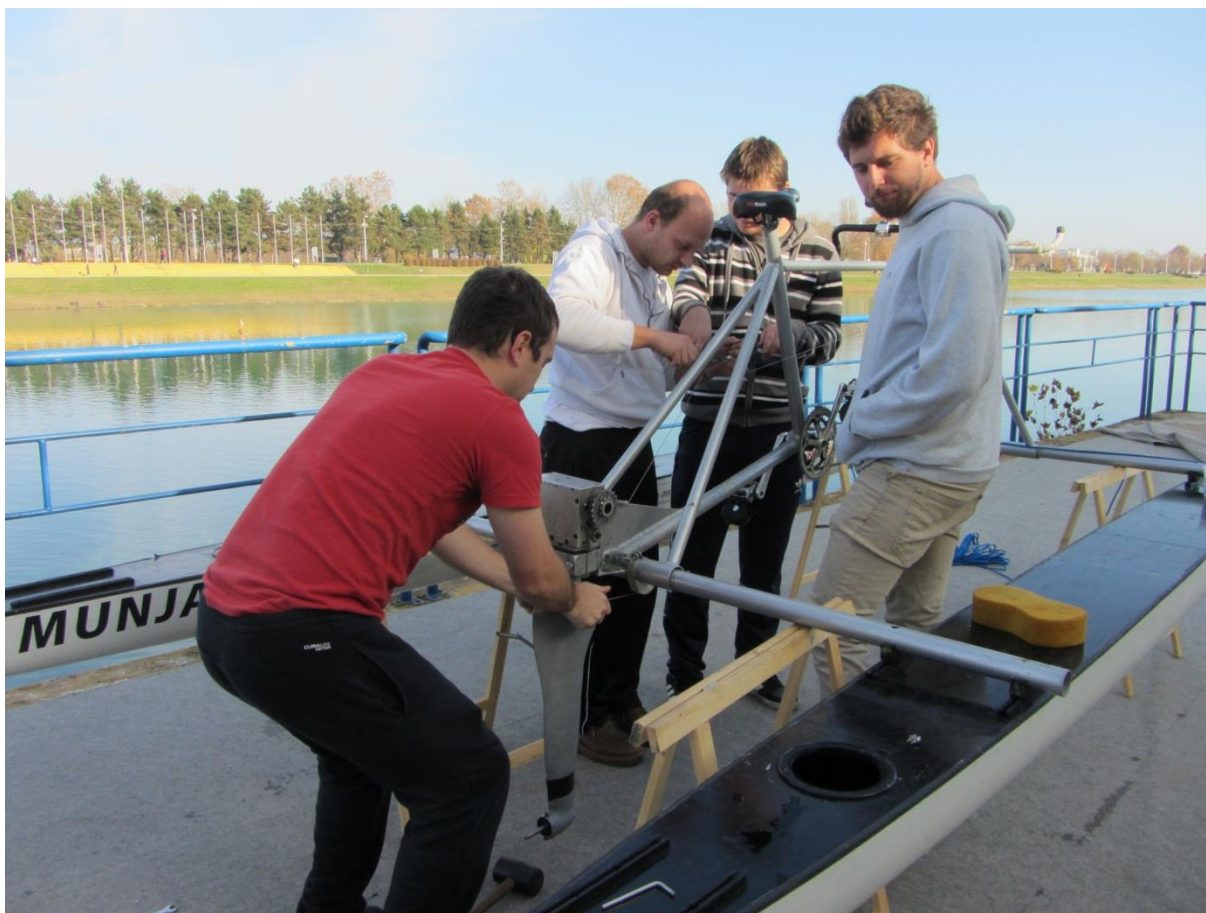
Slika 24. Način veza brodocikla kod druge, treće i četvrte vožnje

4.3.4. Druga vožnja

Zbog neposredne promjene konstrukcije i veza, druga vožnja izvedena je na gotovo jednak način kao i prva vožnja, ali je izvedba bila mnogo kvalitetnija, a rezultati mjerenja precizniji, jer pravac gibanja brodocikla nije odstupao od pravca gibanja broda za tegljenje. Uspješno je izmjereno više točaka brzine duž cijelog Jaranskog jezera u oba smjera gibanja što ukupno iznosi 2250 m u pojedinom smjeru, tj. 4500 m ukupno.

4.3.4.1. Montaža i fiksiranje kormila

Nakon druge vožnje brodocikl je izvučen na obalu te je na njega montirano kormilo koje nije bilo dio konstrukcije u prethodnim vožnjama. Kormilo je fiksirano te je postavljeno u neutralan položaj kako bi se ispitale vrijednosti sile otpora prilikom vožnje unaprijed. Montaža i fiksiranje kormila prikazani su na Slici 25.



Slika 25. Montaža i fiksiranje kormila

4.3.5. Treća vožnja

Zbog instalacije kormila na konstrukciju brodocikla, ukupna se masa plovila povećala pri čemu je vođeno računa da masa brodocikla tijekom treće vožnje značajno ne odstupa od masa u prijašnjim vožnjama. Zbog toga je došlo do promjene vozača, tj. masa vozača smještenog prema krmi mora biti manja jer je na krmeni dio konstrukcije instalirano kormilo. S obzirom na navedeno, bilo je potrebno ponovo izmjeriti gazove brodocikla kako bi treća vožnja nesmetano mogla biti izvedena. Vrijednosti ponovnog mjerenja gazova vidljive su u Tablici 5.

Tablica 5. Vrijednosti ponovnog mjerenja gazova za treću i četvrtu vožnju

	Gaz-Pramac	Gaz-Krma
Desni trup	115 mm	60 mm
Lijevi trup	105 mm	70 mm

Vožnja je izvedena u smjer jugu Jaranskog jezera, a prilikom povratka na sjever došlo je do pucanja graničnika koji fiksiraju kormilo zbog čega nije bilo dovoljno očitanih točaka vrijednosti sile otpora i brzine brodocikla.

4.3.5.1. Ponovno fiksiranje kormila

Obzirom na ranije spomenuto, bilo je potrebno brodocikl izvući na obalu i ponovo fiksirati kormilo te ga ojačati i učvrstiti s više graničnika kako ponovno ne bi došlo do puknuća graničnika i rotacije kormila. Nakon fiksiranja, brodocikl je ponovno vraćen u jezero zbog provođenja četvrte vožnje.

4.3.6. Četvrta vožnja

Četvrta vožnja, ujedno i posljednja, najvažniji je dio pokusa. U toj vožnji izmjerena je sila otpora realnog stanja brodocikla, odnosno onakvog kakvo je korišteno prilikom stvarne plovidbe i na natjecanjima. Za ovu je vožnju uspješno izmjeren najveći broj točaka vrijednosti otpora i odgovarajuće brzine brodocikla.

4.4. Radnje po završetku pokusa

Po završetku pokusa, odnosno uspješno provedenih planiranih radnji, bilo je potrebno rastaviti konstrukciju za tegljenje plovila brodom za tegljenje, baždarenje dinamometra, rastavljanje i transportiranje konstrukcije brodocikla te ponovno mjerenje gustoće vode aerometrom. Prilikom posljednjeg mjerenja aerometrom, gustoća vode nije se mijenjala u odnosu na prvotno mjerenje, tj. i dalje iznositi $1000,5 \text{ kg/m}^3$.

5. ANALIZA REZULTATA

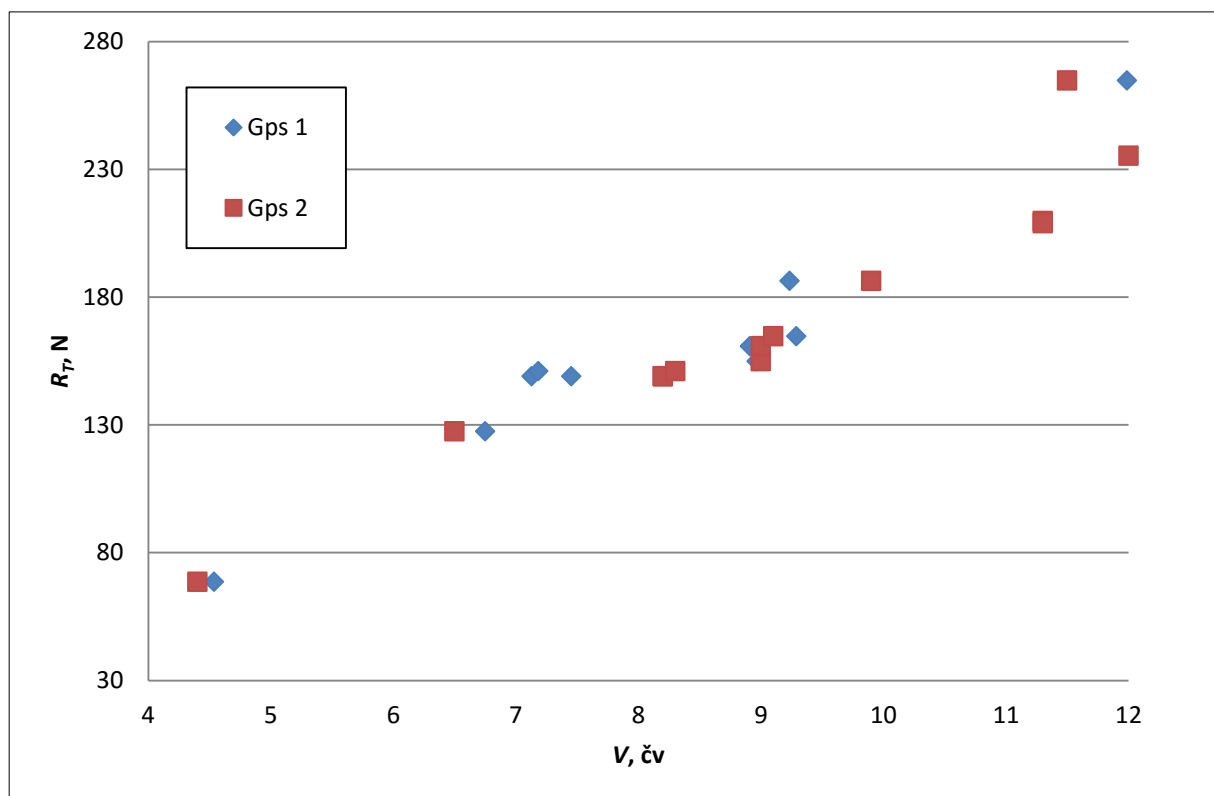
Analizom rezultata prikazani su izmjereni rezultati tijekom svih pet vožnji koje su izvedene s upotrebom dinamometra. Odnosi brzine i sile te sile i snage prikazani su tablično i grafički u sljedećim poglavljima.

5.1. Nulta vožnja

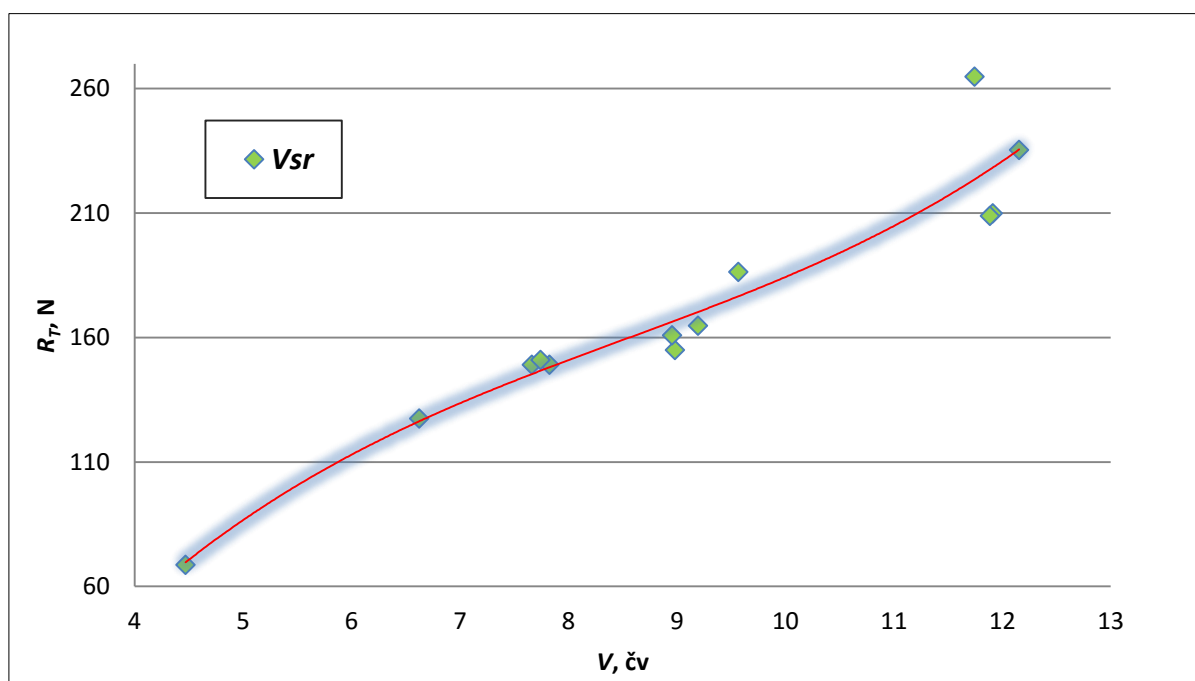
Analizom rezultata mjerenja otpora brodocikla dobivene su vrijednosti sile otpora prikazane u Tablici 6. kojima se namjerava raspolagati u idućim mjerenjima. Ova mjerenja nisu precizna u potpunosti s obzirom na to da je korišten dinamometar 1 koji ima svojstvo greške mjerenja $\pm 0,5$ kg. Također, treba uzeti u obzir da brodocikl nije pratio smjer broda za tegljenja, a gubitkom smjera automatski se povećava otpor, jer nestrujavanje vode na površine trupova brodocikla nije pod nultim napadnim kutem, već se taj kut mijenjao gubitkom smjera gibanje brodocikla. Važno je naglasiti da se rezultati prikazani u Tablici 6. neće uzeti u obzir prilikom usporedbe rezultata mjerenja s rezultatima numeričkog proračuna već isti služe kao kvalitetna orijentacija budućim mjerenjima. Slika 26. prikazuje ovisnost sile otpora o brzini brodocikla, dok je ovisnost snage i brzine brodocikla prikazana na Slici 28. Nadalje, ovisnost sile otpora o srednjoj vrijednosti brzine brodocikla prikazana je na Slici 27., a ovisnost snage i srednje vrijednosti brzine brodocikla Slici 29.

Tablica 6. Analiza rezultata nulte vožnje

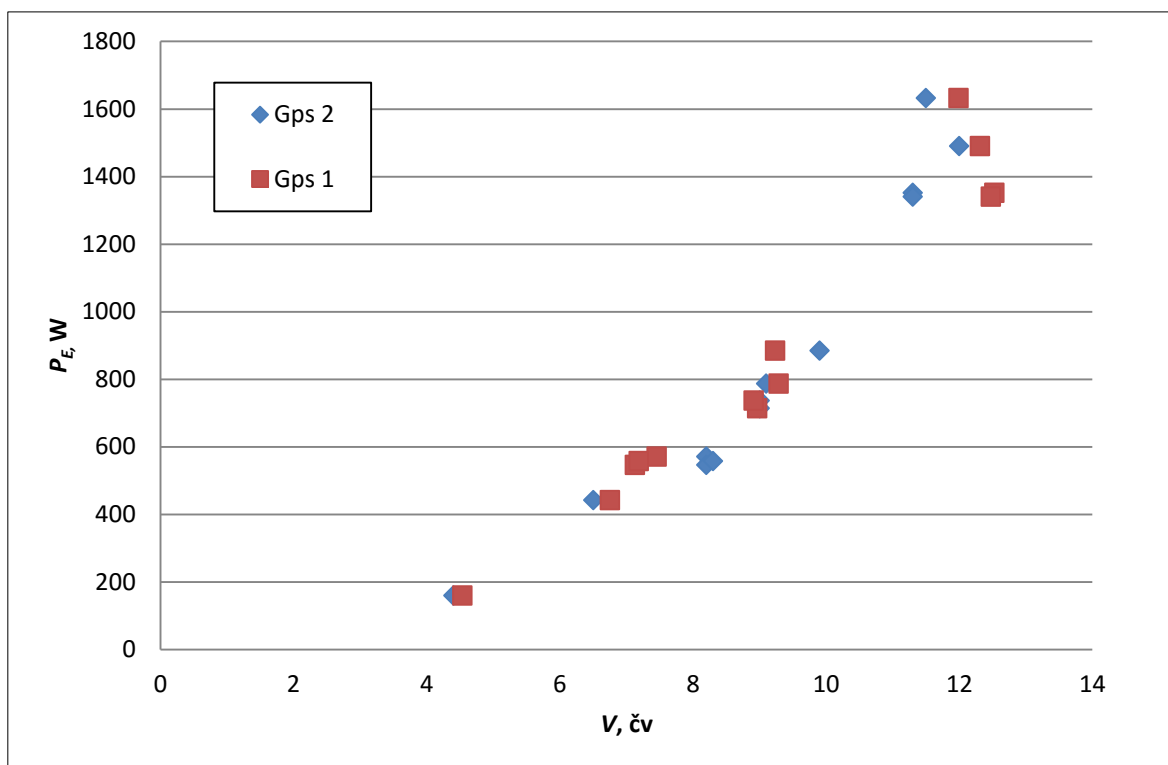
V_{sr}	V_{Gps1}			V_{Gps2}	Izmjerena veličina na dinamometru	R_T	P_E
čv	čv	km/h	m/s	čv	kg	N	W
4,47	4,4	8,4	2,33	4,54	7	68,65	160,18
6,63	6,5	12,5	3,47	6,75	13	127,49	442,66
9,57	9,9	17,1	4,75	9,23	19	186,33	885,05
11,74	11,5	22,2	6,17	11,99	27	264,78	1632,81
8,98	9	16,6	4,61	8,96	15,8	154,95	714,47
12,16	12	22,8	6,33	12,31	24	235,36	1490,61
7,83	8,2	13,8	3,83	7,45	15,2	149,06	571,40
8,96	9	16,5	4,58	8,91	16,4	160,83	737,13
9,19	9,1	17,2	4,78	9,29	16,8	164,75	787,15
11,91	11,3	23,2	6,44	12,53	21,4	209,86	1352,45
11,89	11,3	23,1	6,42	12,47	21,3	208,88	1340,32
7,66	8,2	13,2	3,67	7,13	15,2	149,06	546,56
7,74	8,3	13,3	3,69	7,18	15,4	151,02	557,94



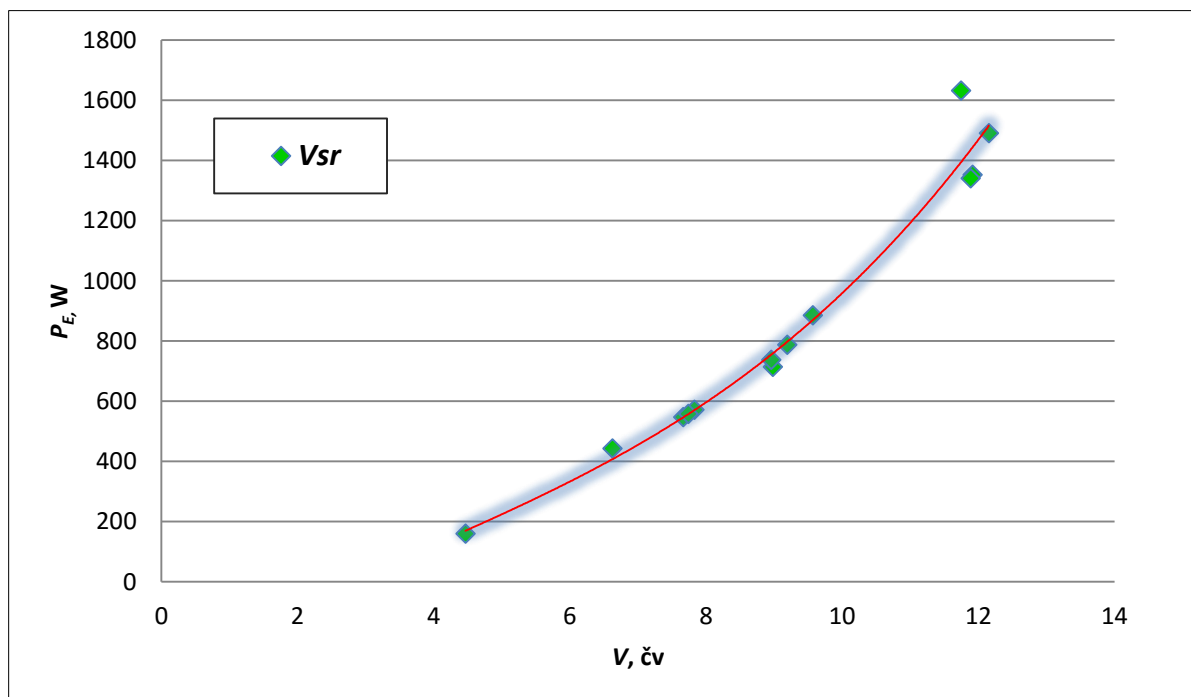
Slika 26. Ovisnost sile otpora o brzini brodocikla u nultoj vožnji



Slika 27. Ovisnost sile otpora o srednjoj vrijednosti brzine brodocikla u nultoj vožnji



Slika 28. Ovisnost snage i brzine brodocikla u nultoj vožnji



Slika 29. Ovisnost snage i srednje vrijednosti brzine brodocikla u nultoj vožnji

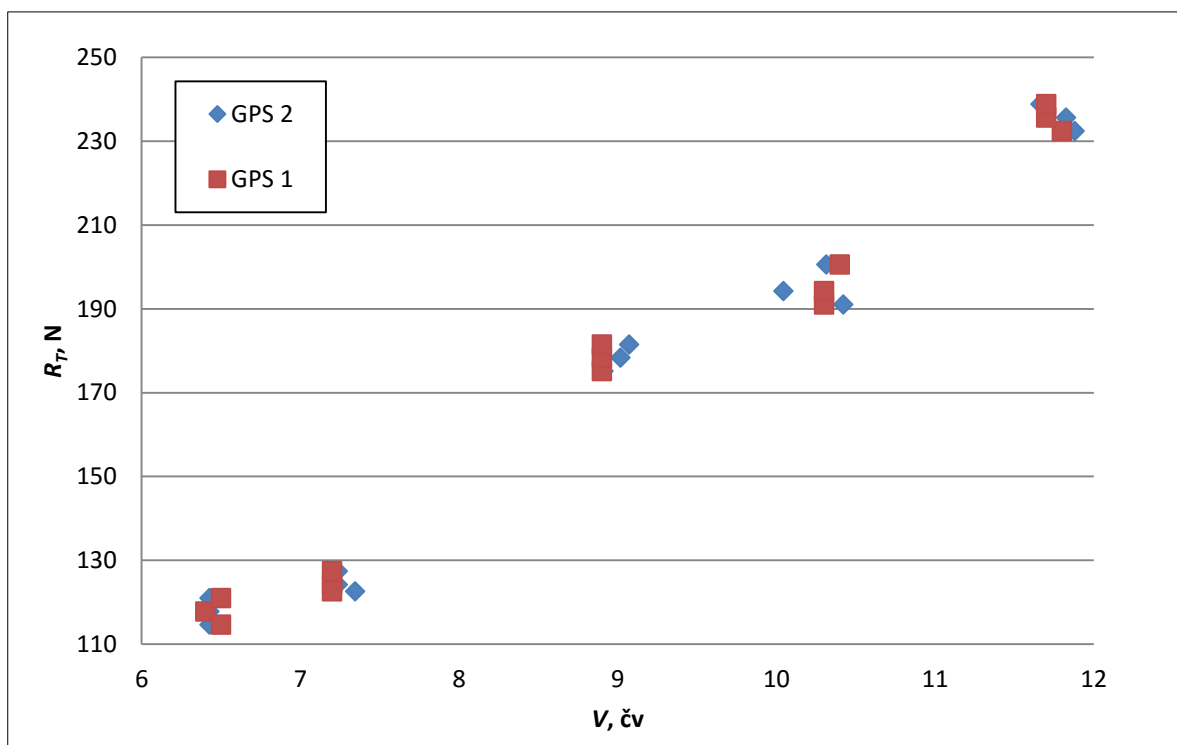
5.2. Prva vožnja

Analizom rezultata prve vožnje dobivene su početne vrijednosti otpora sile u ovisnosti o brzini. Iako je očitano samo pet točaka brzine zbog poteškoća opisanih u prethodnim poglavljima, te vrijednosti dalje mogu biti mjerodavne za iduće vožnje. Zbog premalog broja očitavanja rezultati prve vožnje nisu uzeti u obzir u završnoj analizi, odnosno prilikom usporedbe rezultata.

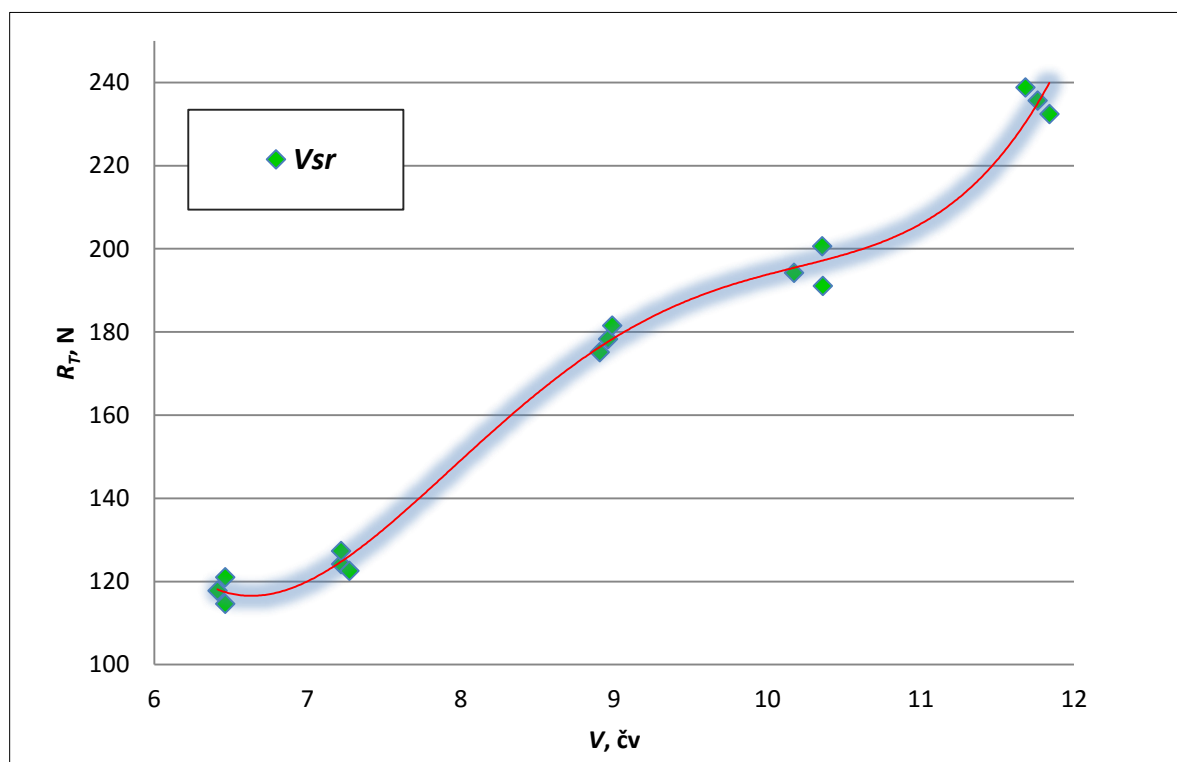
U Tablici 7. prikazana je analiza rezultata prve vožnje i vidljivo je da pri maksimalnoj brzini od 12 čv, koja je i pretpostavljena maksimalna brzina, vrijednost sile otpora iznosi 240 N što odgovara snazi otpora od 1450 W te je ujedno i granica koju bi prosječna snaga ljudskih mišića mogla savladati. Isto tako, korisno je napomenuti kako bi postizanje te brzine omogućilo i bolje pozicioniranje na natjecanjima. Slika 30. prikazuje ovisnost sile otpora o brzini brodocikla, dok je ovisnost snage i brzine brodocikla prikazana na Slici 32. Nadalje, ovisnost sile otpora o srednjoj vrijednosti brzine brodocikla po oba GPS-a prikazana je na Slici 31., a ovisnost snage i srednje vrijednosti brzine brodocikla po oba GPS-a na Slici 33.

Tablica 7. Analiza rezultata prve vožnje

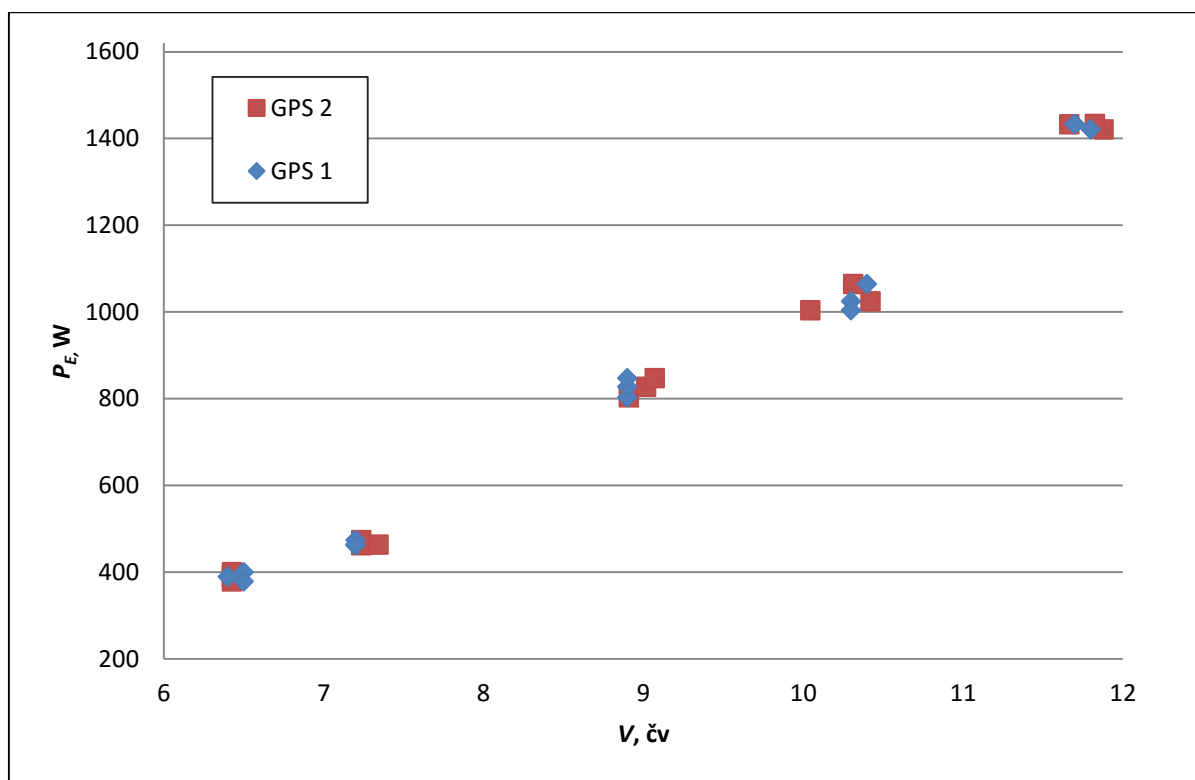
V_{sr}	V_{Gps1}			V_{Gps2}	Izmjerena veličina na dinamometru	R_T	P_E
čv	čv	km/h	m/s	čv	μm	N	W
6,41	6,40	11,9	3,31	6,43	37	117,83	389,51
6,46	6,50	11,9	3,31	6,43	38	121,02	400,04
6,46	6,50	11,9	3,31	6,43	36	114,65	378,98
7,22	7,20	13,4	3,72	7,24	39	124,20	462,31
7,22	7,20	13,4	3,72	7,24	40	127,39	474,17
7,27	7,20	13,6	3,78	7,34	38,5	122,61	463,20
8,91	8,90	16,5	4,58	8,91	55	175,16	802,81
8,96	8,90	16,7	4,64	9,02	56	178,34	827,32
8,99	8,90	16,8	4,67	9,07	57	181,53	847,13
10,36	10,30	19,3	5,36	10,42	60	191,08	1024,42
10,36	10,40	19,1	5,31	10,31	63	200,64	1064,49
10,17	10,30	18,6	5,17	10,04	61	194,27	1003,72
11,84	11,80	22	6,11	11,88	73	232,48	1420,74
11,76	11,70	21,9	6,08	11,83	74	235,67	1433,65
11,68	11,70	21,6	6,00	11,66	75	238,85	1433,12



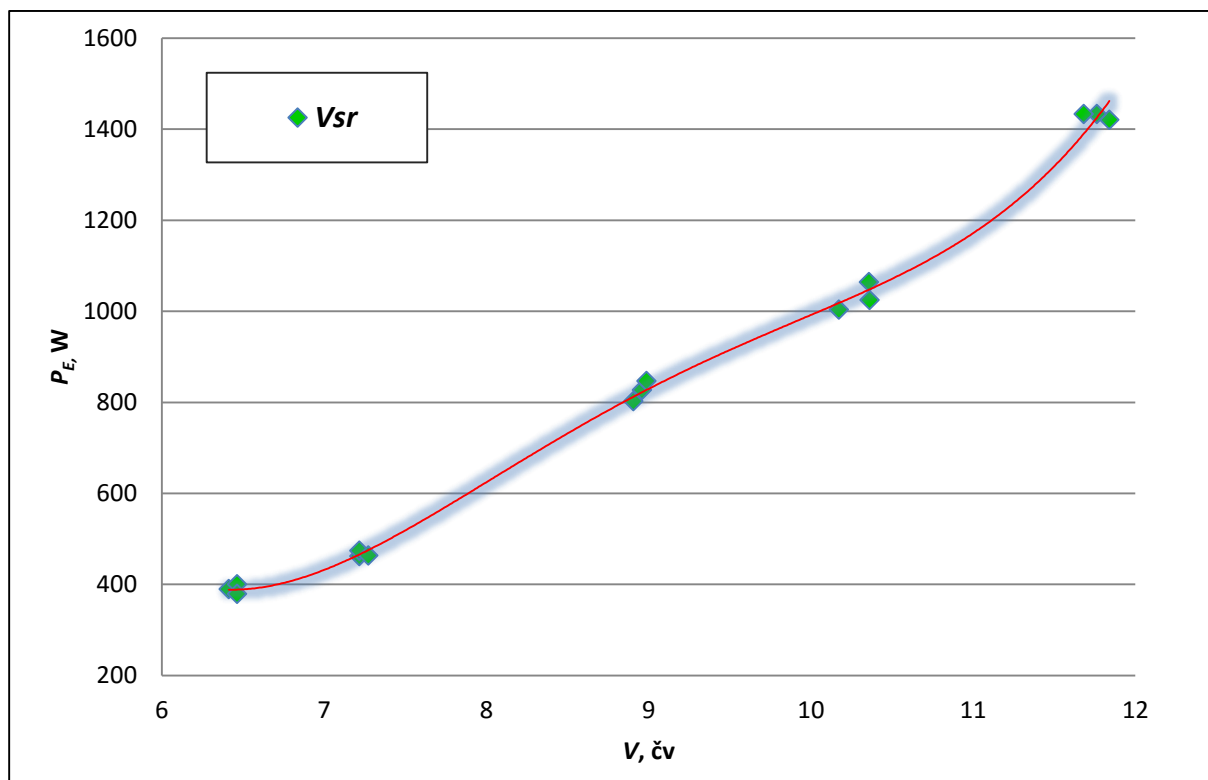
Slika 30. Ovisnost sile otpora o brzini brodocikla u prvoj vožnji



Slika 31. Ovisnost sile otpora o srednjoj vrijednosti brzine brodocikla u prvoj vožnji



Slika 32. Ovisnost snage i brzine brodocikla u prvoj vožnji



Slika 33. Ovisnost snage i srednje vrijednosti brzine brodocikla u prvoj vožnji

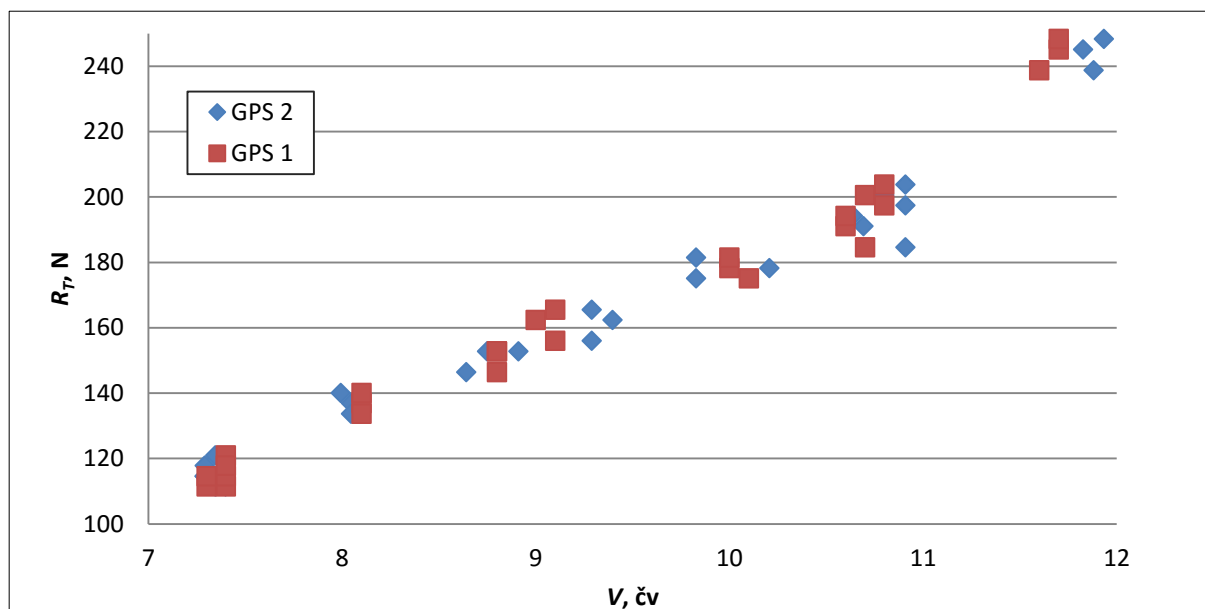
5.3. Druga vožnja

Analizom rezultata druge vožnje, može se zaključiti kako se povećanjem brzine linearno povećava i sila otpora, stoga je druga vožnja uzeta u obzir u završnoj analizi. Iz Tablice 8. vidljivo je kako je očitani veći broj točaka nego u prvoj vožnji te kako je vrijednost sile otpora pri plovnoj brzini od 10 čv oko 180 N, dok je vrijednost sile otpora pri najvećoj brzini od oko 12 čv gotovo 250 N. Na Slikama 34. i 35. vidljivo je kako se vrijednost sile otpora naglo povećava nakon brzine od oko 9 čv. Kako bi plovna brzina od 10 čv bila postignuta, potrebno je savladati snagu otpora od oko 900 W.

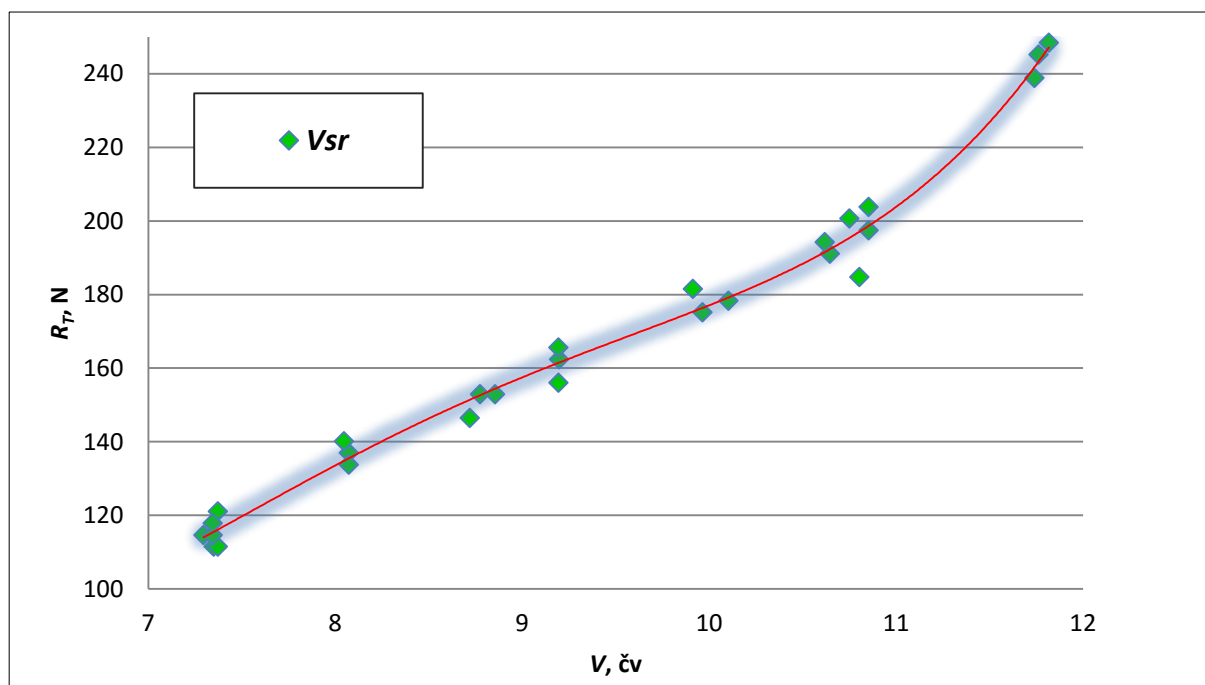
Tablica 8. Analiza rezultata druge vožnje

V_{sr}	V_{Gps1}			V_{Gps2}	Izmjerena veličina na dinamometru		P_E
čv	čv	km/h	m/s	čv	μm	N	W
7,35	7,3	13,7	3,81	7,40	35	111,46	424,19
7,30	7,3	13,5	3,75	7,29	36	114,65	429,94
7,37	7,4	13,6	3,78	7,34	35	111,46	421,09
7,37	7,4	13,6	3,78	7,34	38	121,02	457,18
7,35	7,4	13,5	3,75	7,29	36	114,65	429,94
7,35	7,4	13,5	3,75	7,29	37	117,83	441,88
8,07	8,1	14,9	4,14	8,05	43	136,94	566,79
8,05	8,1	14,8	4,11	7,99	44	140,13	576,08
8,07	8,1	14,9	4,14	8,05	42	133,76	553,61
8,77	8,8	16,2	4,50	8,75	48	152,87	687,90
8,72	8,8	16	4,44	8,64	46	146,50	651,10
8,86	8,8	16,5	4,58	8,91	48	152,87	700,64
9,20	9	17,4	4,83	9,40	51	162,42	785,03
9,19	9,1	17,2	4,78	9,29	52	165,61	791,22
9,19	9,1	17,2	4,78	9,29	49	156,05	745,58
10,10	10	18,9	5,25	10,21	56	178,34	936,31
9,91	10	18,2	5,06	9,83	57	181,53	917,73
9,96	10,1	18,2	5,06	9,83	55	175,16	885,53
10,80	10,7	20,2	5,61	10,91	58	184,71	1036,45
10,65	10,6	19,8	5,50	10,69	60	191,08	1050,96
10,62	10,6	19,7	5,47	10,64	61	194,27	1063,08
10,85	10,8	20,2	5,61	10,91	62	197,45	1107,93
10,85	10,8	20,2	5,61	10,91	64	203,82	1143,67
10,75	10,7	20	5,56	10,80	63	200,64	1114,65
11,74	11,6	22	6,11	11,88	75	238,85	1459,66
11,76	11,7	21,9	6,08	11,83	77	245,22	1491,77
11,82	11,7	22,1	6,14	11,93	78	248,41	1524,95

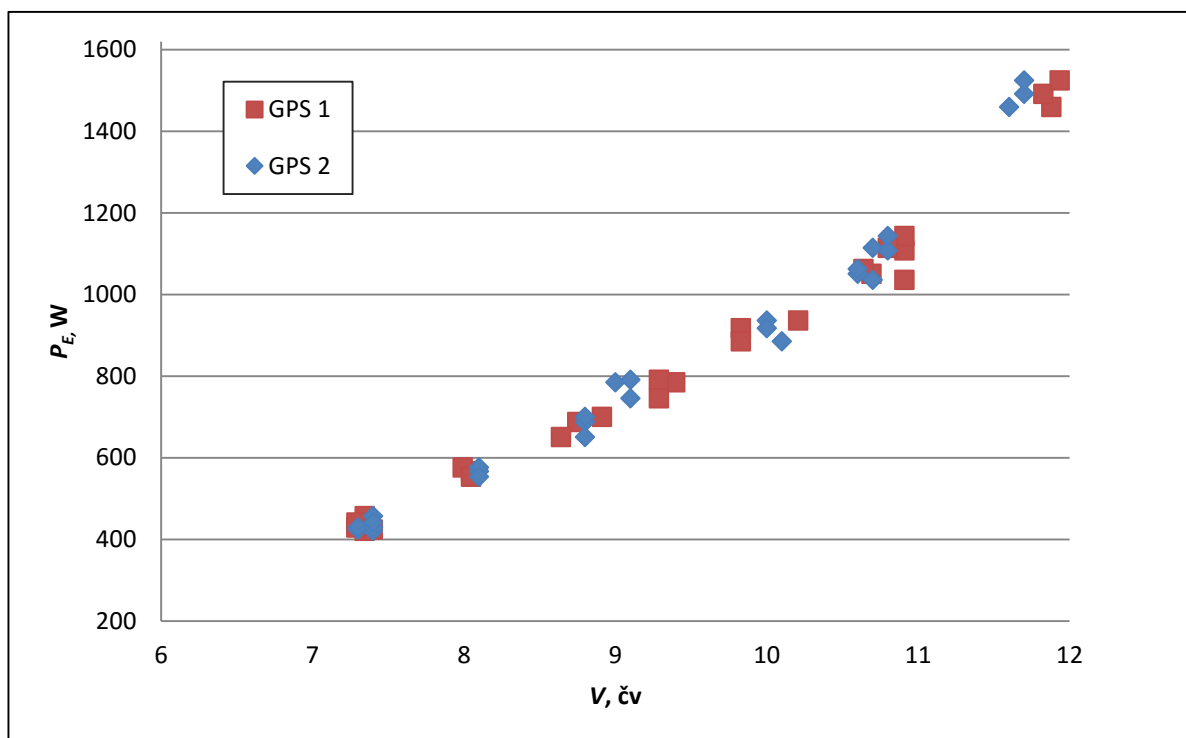
Slika 34. prikazuje ovisnost sile otpora o brzini brodocikla, dok je ovisnost snage i brzine brodocikla prikazana na Slici 36. Nadalje, ovisnost sile otpora o srednjoj vrijednosti brzine brodocikla po oba GPS-a prikazana je na Slici 35., a ovisnost snage i srednje vrijednosti brzine brodocikla po oba GPS-a na Slici 37.



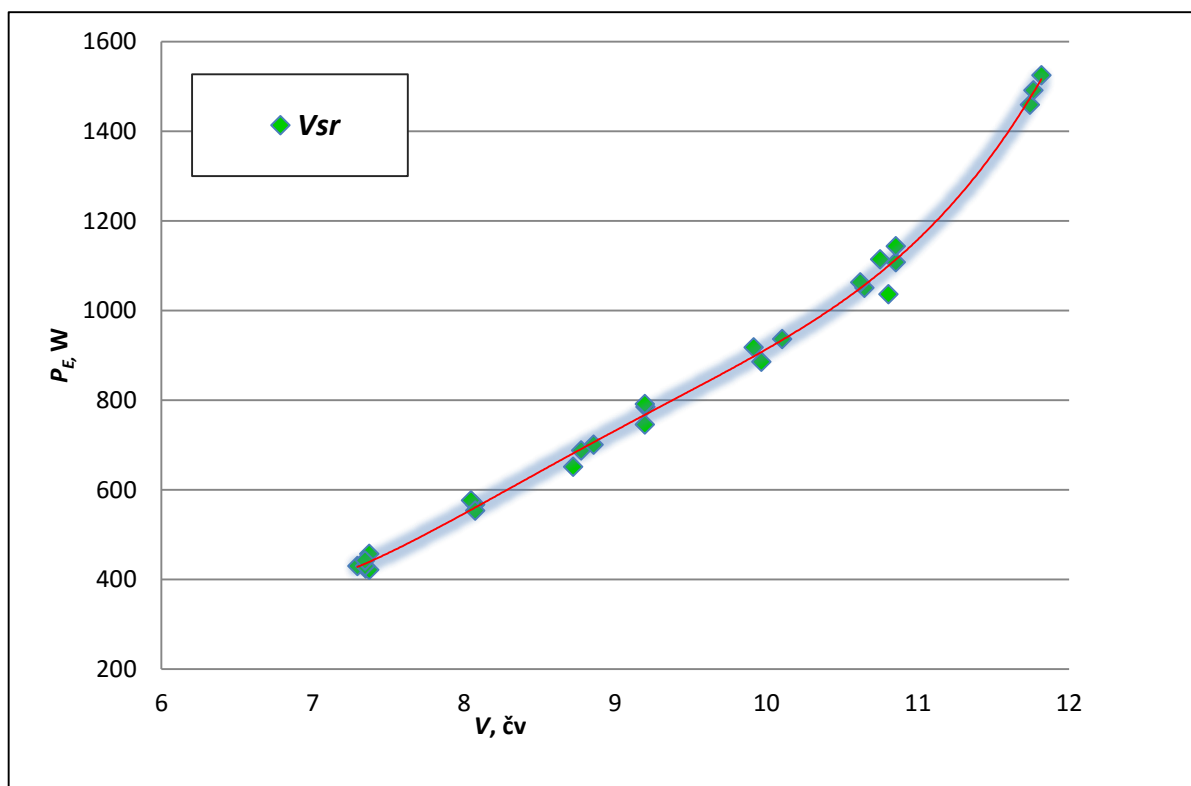
Slika 34. Ovisnost sile otpora o brzini brodocikla u drugoj vožnji



Slika 35. Ovisnost sile otpora o srednjoj vrijednosti brzine brodocikla u drugoj vožnji



Slika 36. Ovisnost snage i brzine brodocikla u drugoj vožnji



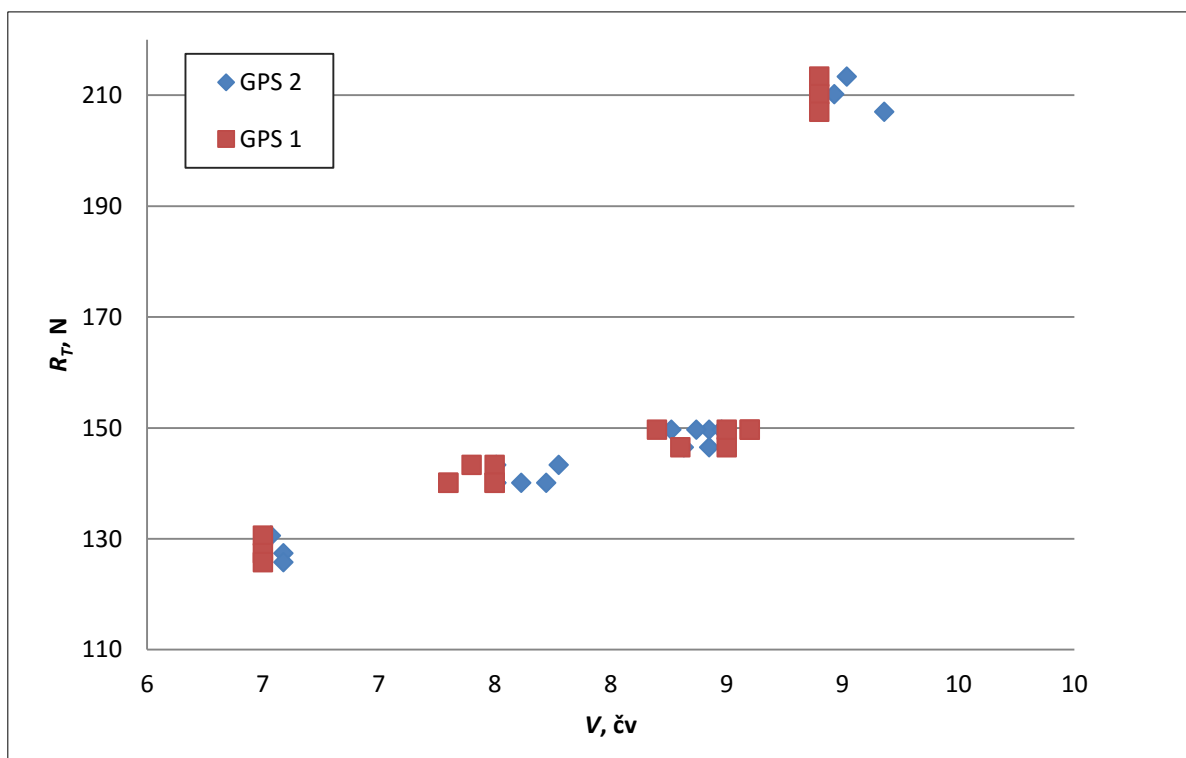
Slika 37. Ovisnost snage i srednje vrijednosti brzine brodocikla u drugoj vožnji

5.4. Treća vožnja

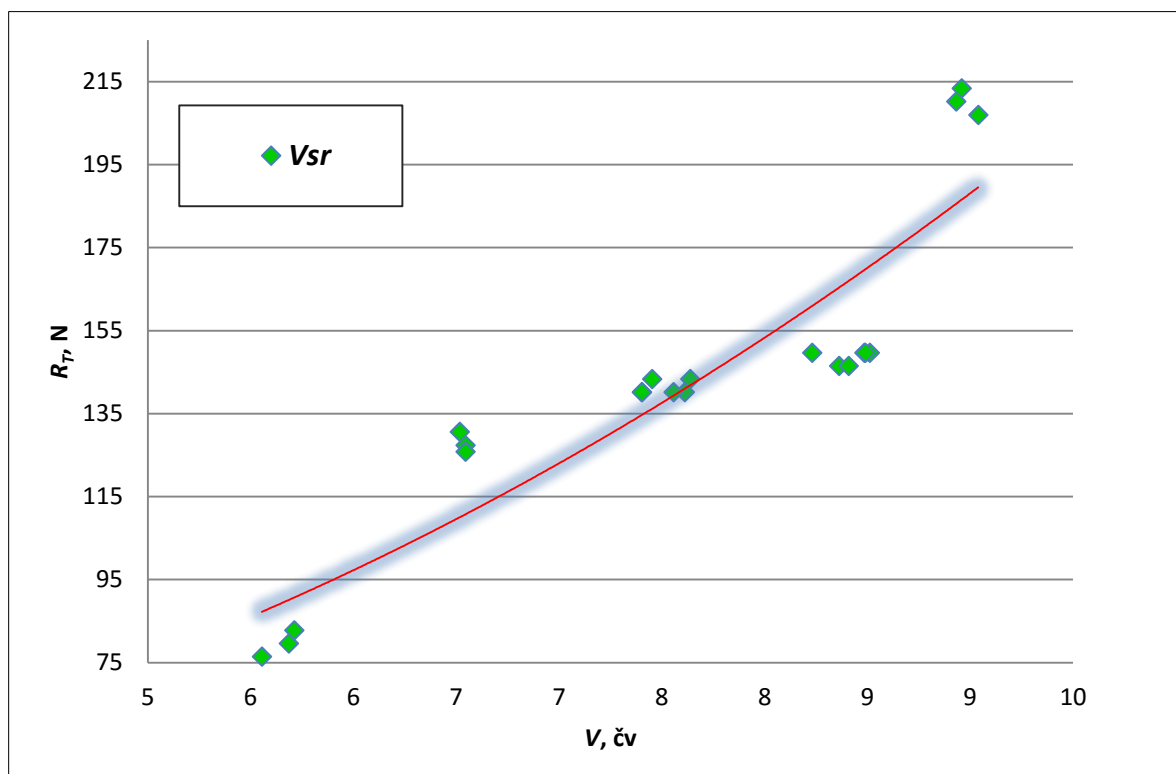
Analizom rezultata dobivenih u trećoj vožnji vidljivo je da je sila otpora u odnosu na drugu vožnju znatno veća čemu je razlog to što je konstrukciji brodocikla dodano kormilo koje također sudjeluje u otporu. U Tablici 8. vidljivo je da u drugoj vožnji sila otpora pri 9 čv iznosi oko 150 N, dok u trećoj vožnji pri istoj brzini sila otpora iznosi oko 200 N, Tablica 9. što znači da je došlo do znatnog povećanja otpora u odnosu na drugu vožnju, odnosno na vožnju bez kormila gdje sudjeluju samo trupovi brodocikla. Kao što je prethodno navedeno, zbog poteškoća s kormilom, nije bilo moguće očitati više točaka brzina te treća vožnja nije uzeta u obzir u završnoj analizi. Slika 38. prikazuje ovisnost sile otpora o brzini brodocikla, dok je ovisnost snage i brzine brodocikla prikazana na Slici 40. Nadalje, ovisnost sile otpora o srednjoj vrijednosti brzine brodocikla prikazana je na Slici 39., a ovisnost snage i srednje vrijednosti brzine brodocikla prikazana na Slici 41.

Tablica 9. Analiza rezultata treće vožnje

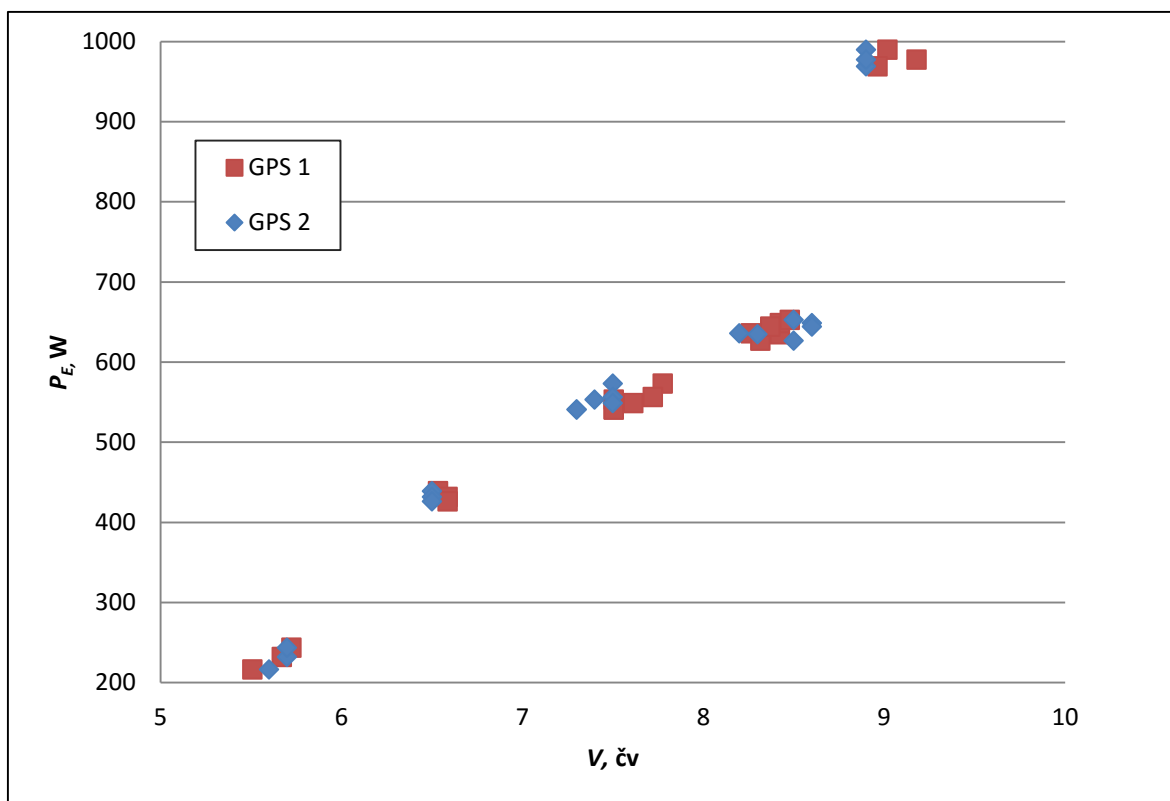
V_{sr}	V_{Gps1}			V_{Gps2}	Izmjerena veličina na dinamometru	R_T	P_E
čv	čv	km/h	m/s	čv	μm	N	W
5,55	5,6	10,2	2,83	5,51	24	76,43	216,56
5,69	5,7	10,5	2,92	5,67	25	79,62	232,22
5,71	5,7	10,6	2,94	5,72	26	82,80	243,81
6,52	6,5	12,1	3,36	6,53	41	130,57	438,87
6,54	6,5	12,2	3,39	6,59	40	127,39	431,71
6,54	6,5	12,2	3,39	6,59	39,5	125,80	426,31
7,40	7,3	13,9	3,86	7,51	44	140,13	541,05
7,45	7,4	13,9	3,86	7,51	45	143,31	553,34
7,40	7,3	13,9	3,86	7,51	44	140,13	541,05
7,64	7,5	14,4	4,00	7,78	45	143,31	573,25
7,61	7,5	14,3	3,97	7,72	44	140,13	556,62
7,56	7,5	14,1	3,92	7,61	44	140,13	548,83
8,23	8,2	15,3	4,25	8,26	47	149,68	636,15
8,36	8,3	15,6	4,33	8,42	46	146,50	634,82
8,41	8,5	15,4	4,28	8,32	46	146,50	626,68
8,51	8,6	15,6	4,33	8,42	47	149,68	648,62
8,49	8,6	15,5	4,31	8,37	47	149,68	644,46
8,49	8,5	15,7	4,36	8,48	47	149,68	652,78
8,96	8,9	16,7	4,64	9,02	67	213,38	989,83
8,93	8,9	16,6	4,61	8,96	66	210,19	969,21
9,04	8,9	17	4,72	9,18	65	207,01	977,53



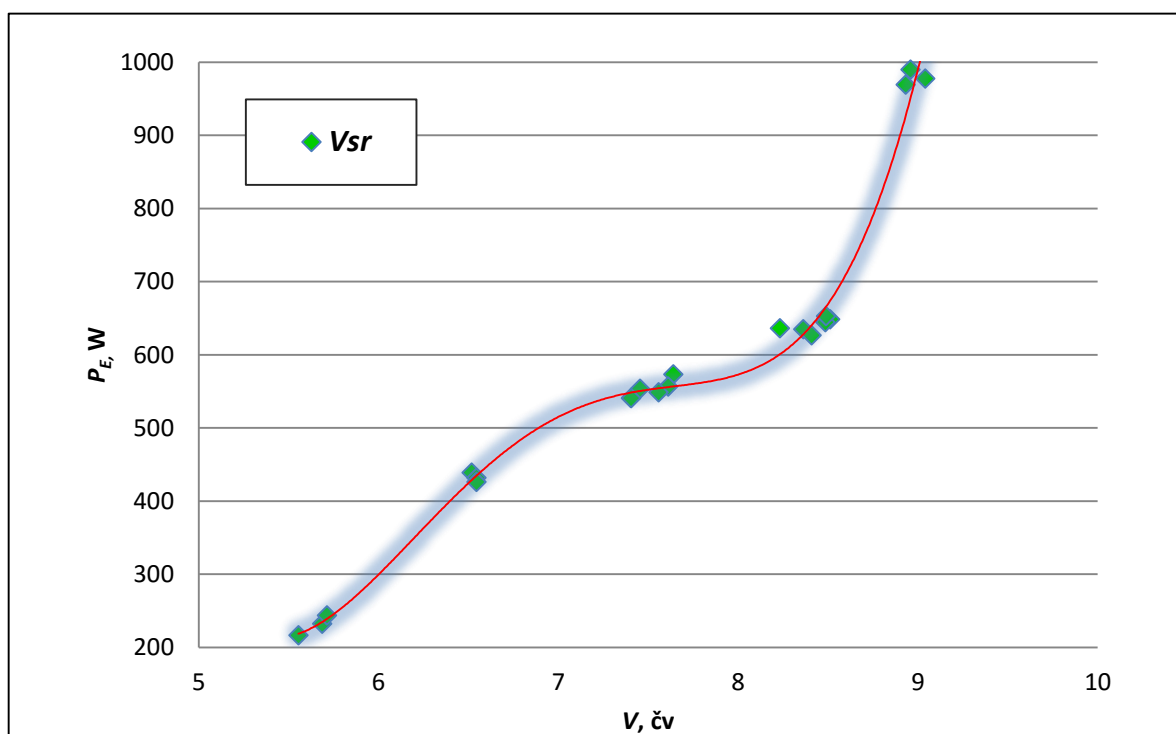
Slika 38. Ovisnost sile otpora o brzini brodocikla u trećoj vožnji



Slika 39. Ovisnost sile otpora o srednjoj vrijednosti brzine brodocikla u trećoj vožnji



Slika 40. Ovisnost snage i brzine brodocikla u trećoj vožnji



Slika 41. Ovisnost snage i srednje vrijednosti brzine brodocikla u trećoj vožnji

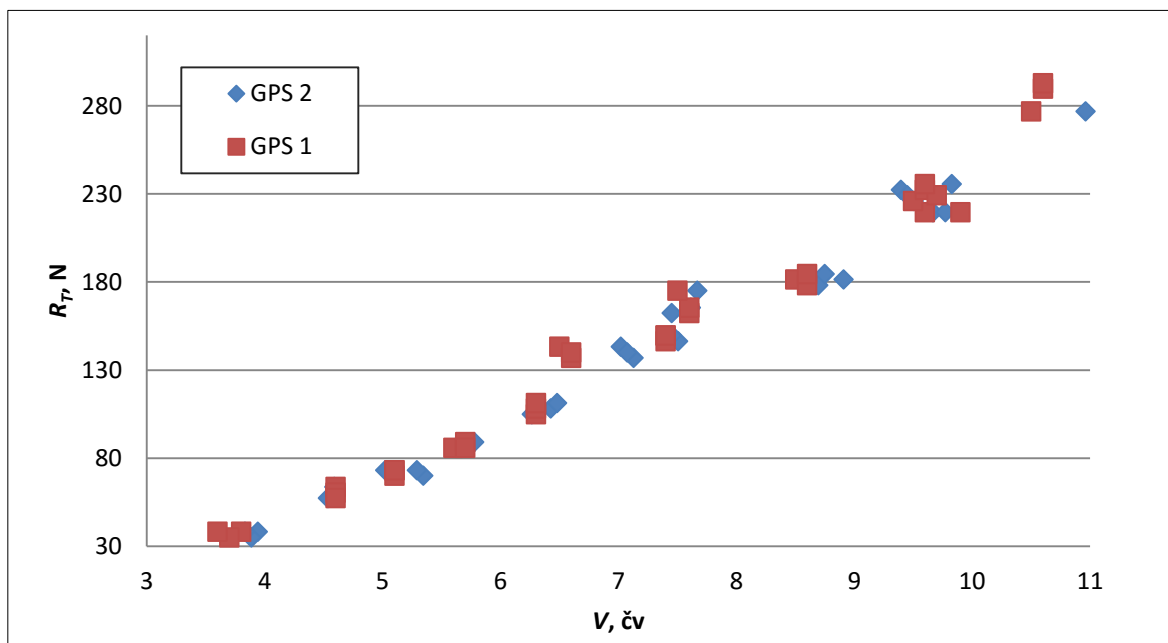
5.5. Četvrta vožnja

Analizom rezultata četvrte vožnje, može se zaključiti kako je ovo najpouzdanija analiza koja prikazuje realnu konstrukciju koja se koristi kao postojeća konstrukcija natjecateljskog brodocikla. Kod ove analize uspješno su obuhvaćene sve vrijednosti brzine, od nule do maksimuma koje brodocikl postiže pri zadanim uvjetima, stoga je četvrta vožnja uzeta u obzir u završnoj analizi. Pri maksimalnoj brzini od 11 čv vidljivo je kako sila otpora odgovara maksimalnoj sili od 290 N. Također, na Slikama 42. i 43. vidljivo je kako se otpor naglo povećava između 3 i 5 čv što ukazuje na činjenicu da kormilo ne utječe toliko na otpor pri manjim brzinama. Međutim, daljnjim povećanjem brzine kormilo znatno utječe na otpor. U usporedbi s drugom vožnjom sila pri 10 čv iznosi 180 N, dok pri istoj brzini s kormilom sila iznosi oko 240 N, Tablica 10.

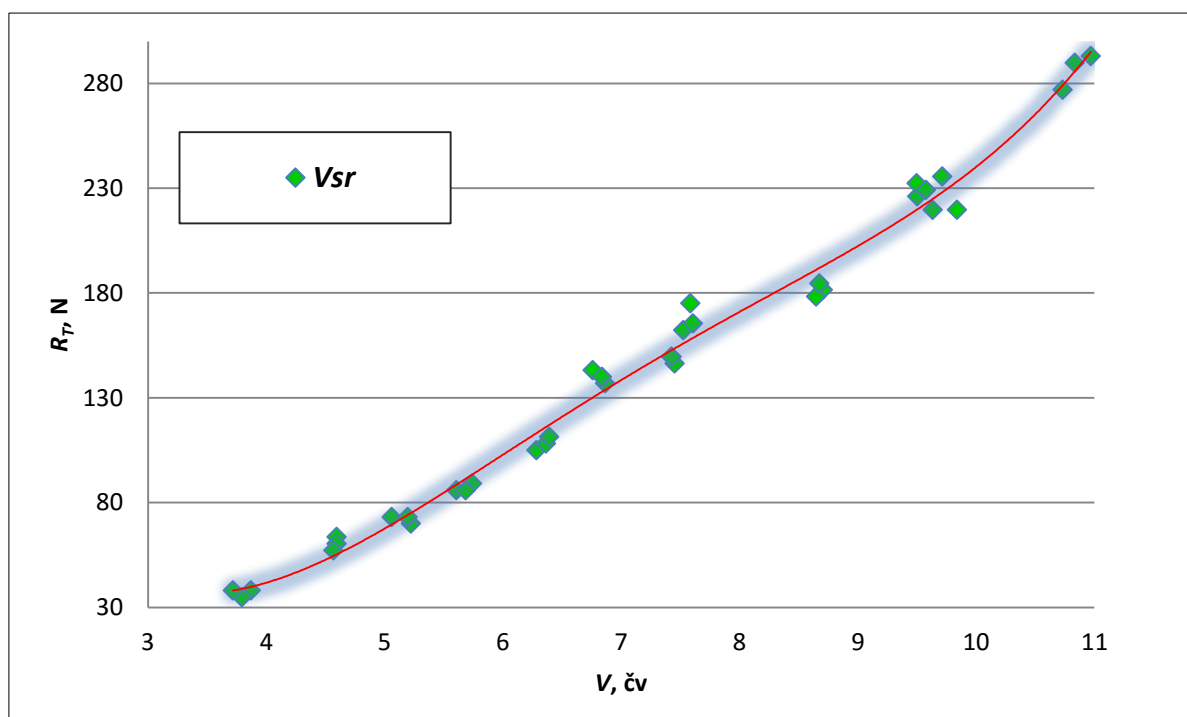
Tablica 10. Analiza rezultata četvrte vožnje

V_{sr}	V_{Gps1}			V_{Gps2}	Izmjerena veličina na dinamometru	R_T	P_E
čv	čv	km/h	m/s	čv	μm	N	W
3,87	3,8	7,3	2,03	3,94	12	38,22	77,49
3,79	3,7	7,2	2,00	3,89	11	35,03	70,06
3,72	3,6	7,1	1,97	3,83	12	38,22	75,37
4,60	4,6	8,5	2,36	4,59	20	63,69	150,39
4,60	4,6	8,5	2,36	4,59	19	60,51	142,87
4,57	4,6	8,4	2,33	4,54	18	57,32	133,76
5,06	5,1	9,3	2,58	5,02	23	73,25	189,23
5,22	5,1	9,9	2,75	5,35	22	70,06	192,68
5,20	5,1	9,8	2,72	5,29	23	73,25	199,40
5,61	5,6	10,4	2,89	5,62	27	85,99	248,41
5,74	5,7	10,7	2,97	5,78	28	89,17	265,04
5,69	5,7	10,5	2,92	5,67	27	85,99	250,80
6,28	6,3	11,6	3,22	6,26	33	105,10	338,64
6,36	6,3	11,9	3,31	6,43	34	108,28	357,93
6,39	6,3	12	3,33	6,48	35	111,46	371,55
6,76	6,5	13	3,61	7,02	45	143,31	517,52
6,86	6,6	13,2	3,67	7,13	43	136,94	502,12
6,84	6,6	13,1	3,64	7,07	44	140,13	509,91
7,43	7,4	13,8	3,83	7,45	47	149,68	573,78
7,45	7,4	13,9	3,86	7,51	46	146,50	565,64
7,43	7,4	13,8	3,83	7,45	47	149,68	573,78
7,53	7,6	13,8	3,83	7,45	51	162,42	622,61
7,61	7,6	14,1	3,92	7,61	52	165,61	648,62
7,58	7,5	14,2	3,94	7,67	55	175,16	690,91
8,71	8,5	16,5	4,58	8,91	57	181,53	832,01
8,65	8,6	16,1	4,47	8,69	56	178,34	797,59
8,67	8,6	16,2	4,50	8,75	58	184,71	831,21
9,63	9,6	17,9	4,97	9,67	69	219,75	1092,62
9,50	9,5	17,6	4,89	9,50	71	226,11	1105,45
9,84	9,9	18,1	5,03	9,77	69	219,75	1104,83
9,50	9,6	17,4	4,83	9,40	73	232,48	1123,67
9,58	9,7	17,5	4,86	9,45	72	229,30	1114,65
9,71	9,6	18,2	5,06	9,83	74	235,67	1191,44
10,84	10,6	20,5	5,69	11,07	91	289,81	1650,30
10,73	10,5	20,3	5,64	10,96	87	277,07	1562,37
10,97	10,6	21	5,83	11,34	92	292,99	1709,13

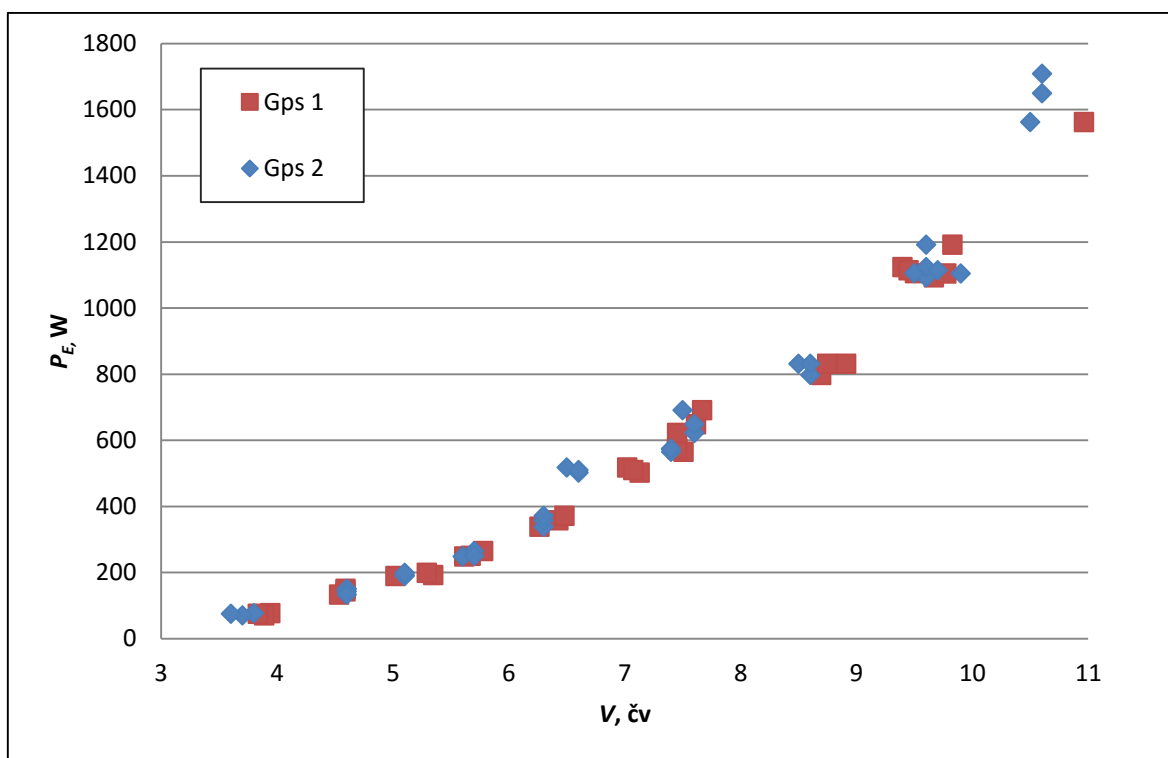
Slika 42. prikazuje ovisnost sile otpora o brzini brodocikla, dok je ovisnost snage i brzine brodocikla prikazana na Slici 44. Nadalje, ovisnost sile otpora o srednjoj vrijednosti brzine brodocikla prikazana je na Slici 43., a ovisnost snage i srednje vrijednosti brzine brodocikla na Slici 45.



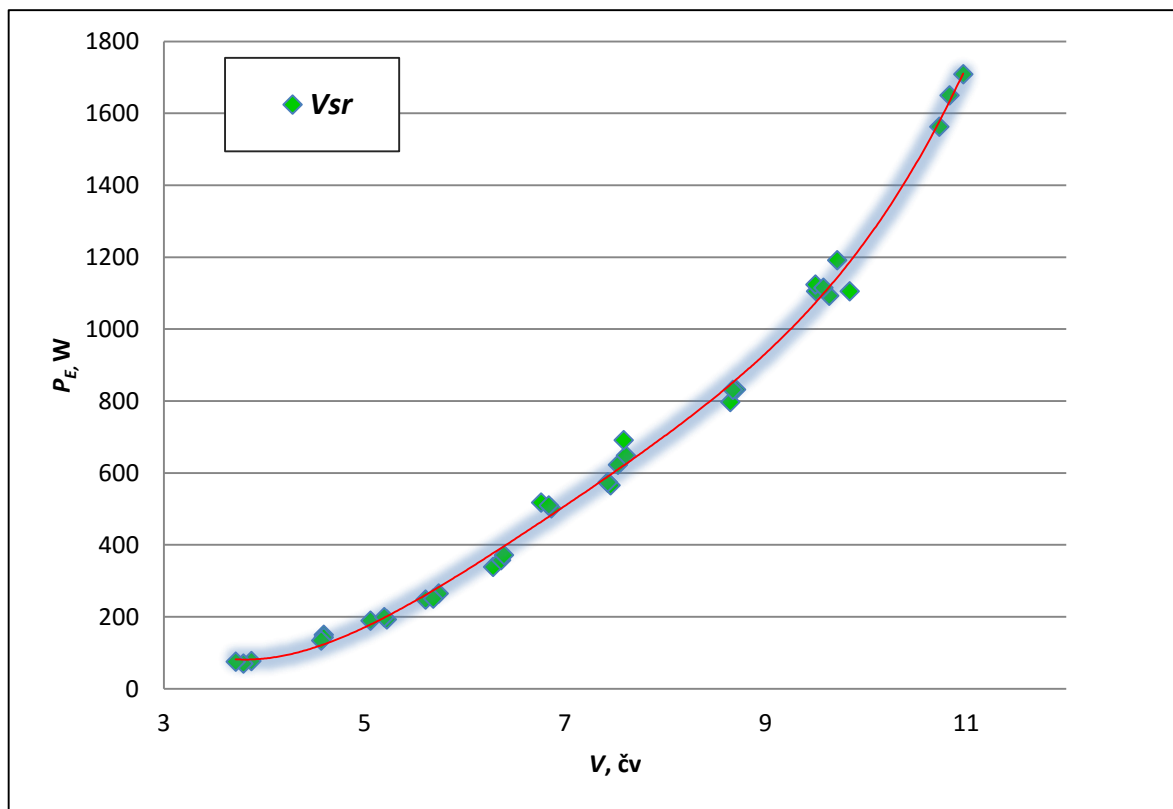
Slika 42. Ovisnost sile otpora o brzini brodocikla u četvrtoj vožnji



Slika 43. Ovisnost sile otpora o srednjoj vrijednosti brzine brodocikla u četvrtoj vožnji



Slika 44. Ovisnost snage i brzine brodocikla u četvrtoj vožnji



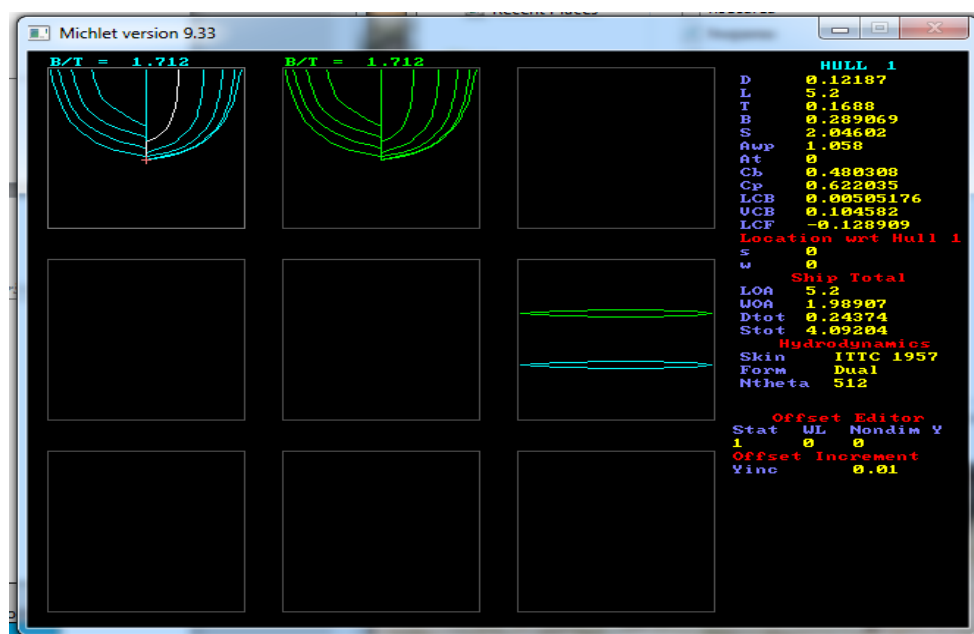
Slika 45. Ovisnost snage i srednje vrijednosti brzine brodocikla u četvrtoj vožnji

6. USPOREDBA S NUMERIČKIM PRORAČUNOM OTPORA

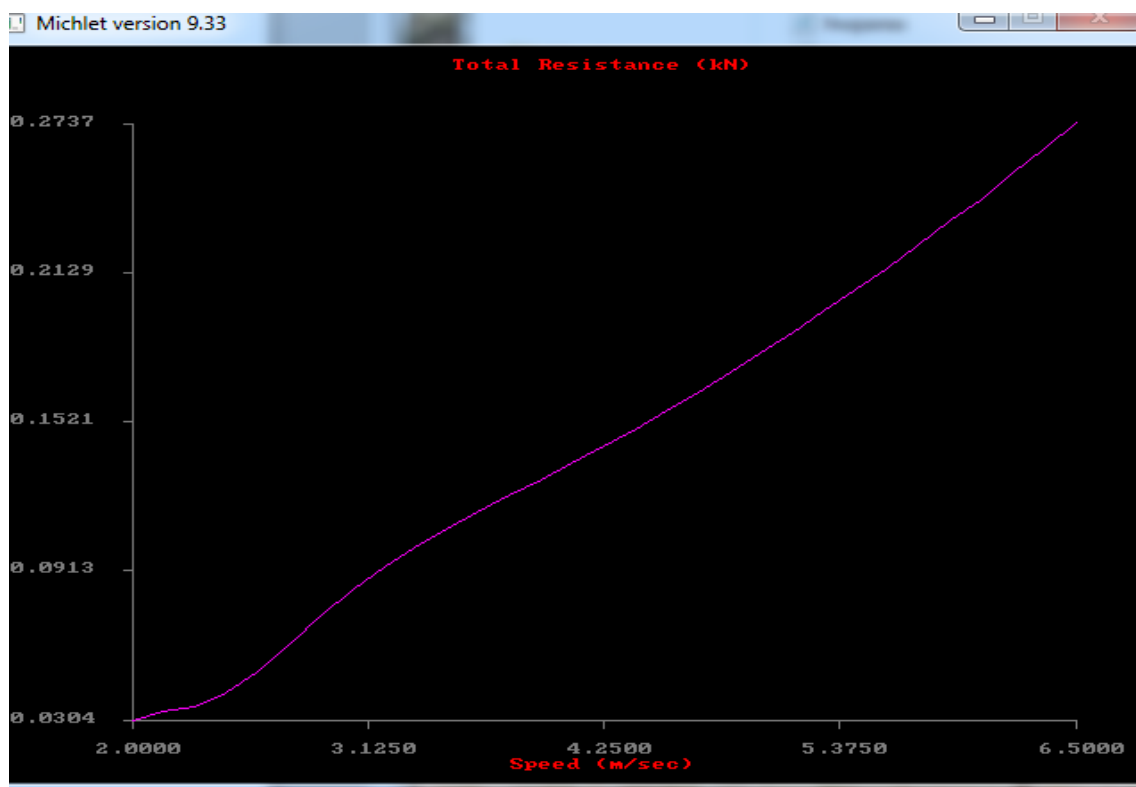
Eksperimentalno određeni otpor plovila na ljudski pogon uspoređen je s rezultatima dobivenima numeričkim programom za izračun otpora *Michlet version 9.33* (Slika 46.) koji izračunava ukupni otpor. Također, program ima mogućnost računanja pojedinih komponenti otpora kao npr. otpor valova, otpor trenja i sl. Usporedba je provedena na način da je *Michlet* programom izračunat ukupni otpor brodocikla i uspoređen s eksperimentalno dobivenim rezultatima. Program funkcionira tako da se unose vrijednosti koordinata trupova brodocikla, odnosno forme trupava koji sudjeluju u ukupnom otporu brodocikla. Vrijednosti gazova izmjerenih u eksperimentalnom dijelu su također unesene u proračun programa. Isto tako, sve druge vrijednosti dobivene eksperimentalnim dijelom kao npr. gustoća vode, temperatura vode, kinematička viskoznost, tlak zraka i dr., unesene su u program. Važno je istaknuti da program funkcionira na osnovi korelacijske linije ITTC '57.

6.1. Usporedba eksperimentalno dobivenih rezultata otpora plovila s numerički dobivenim rezultatima u drugoj vožnji

Usporedba eksperimentalnog određivanja otpora plovila s numeričkim programom provedena je samo za drugu i četvrtu vožnju, odnosno vožnjom sa i bez kormila iz razloga što obje vožnje sadrže najviše očitanih točaka brzine zbog čega se mogu smatrati relevantnima.



Slika 46. Sučelje *Michlet*



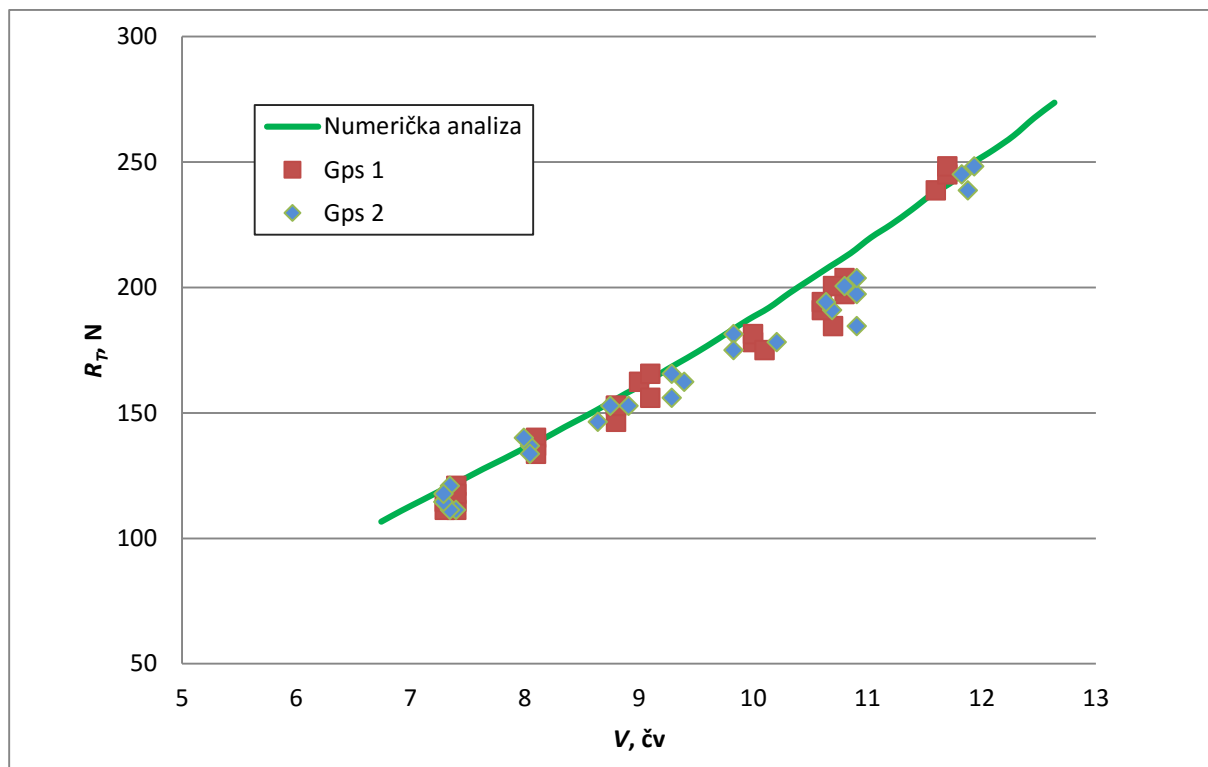
Slika 47. Numerički dobivena krivulja sile otpora

Nakon zadavanja svih ulaznih varijabli programa, kao i vrijednosti brzina iz eksperimentalnog dijela, proveden je numerički proračun. Slika 47. prikazuje krivulju sile otpora u ovisnosti o brzini za trupove bez kormila.

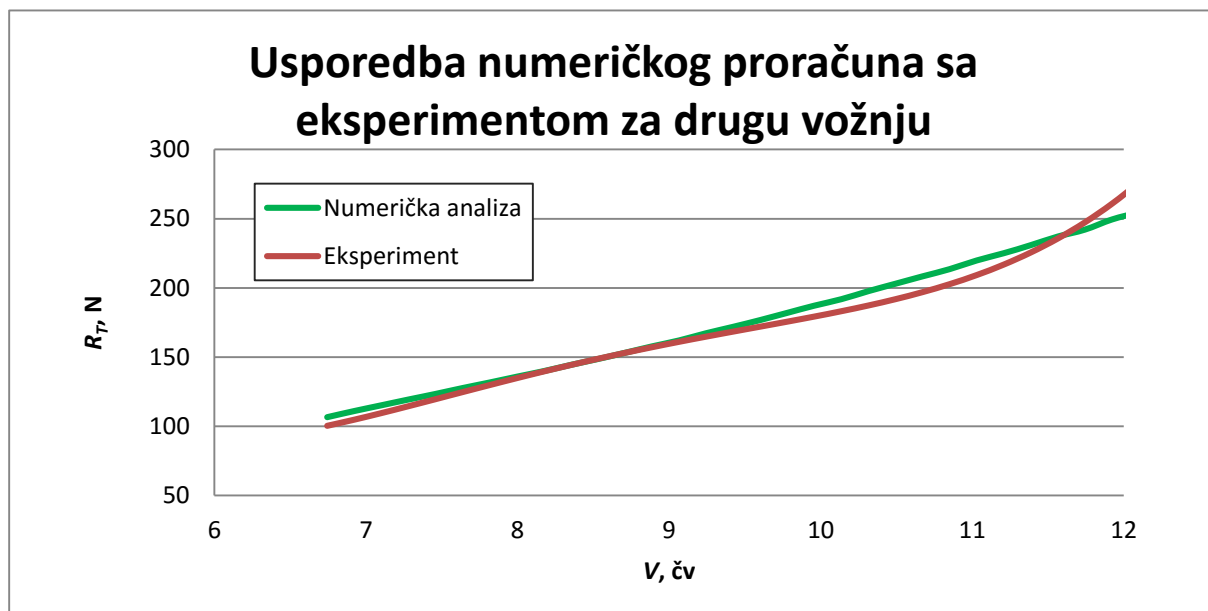
Usporedba numeričkih rezultata i eksperimenta prikazana je u Tablici 11. Stupci u boji odgovaraju boji krivulja u svim dijagramima. Što se tiče druge vožnje, odnosno vožnje bez trupova, relativna greška kreće se u granicama do maksimalnih 6 % za brzine koje su dobivene eksperimentalnim putem. Relativna greška temelji se na eksperimentalno dobivenim vrijednostima te je jednaka apsolutnoj razlici vrijednosti dobivenih eksperimentalnim i numeričkim putem podijeljenoj s vrijednostima dobivenim eksperimentalno [6]. Kod pretpostavljene plovne brzine od 10 čv greška iznosi oko 4,5 %. Prevladavaju greške koje su manje od te vrijednost, tj. kreću se u intervalu od 0 do 2 % dok je za maksimalnu pretpostavljenu brzinu od 12 čv greška oko 6 %. Može se zaključiti kako numeričke vrijednosti odgovaraju eksperimentalno dobivenim rezultatima. Odstupanja ovisnosti sile i brzine vidljiva su na Slikama 48. i 49., a odstupanja ovisnosti snage i brzine vidljiva su na Slikama 50. i 51.

Tablica 11. Usporedba numeričke analize i eksperimenta za drugu vožnju

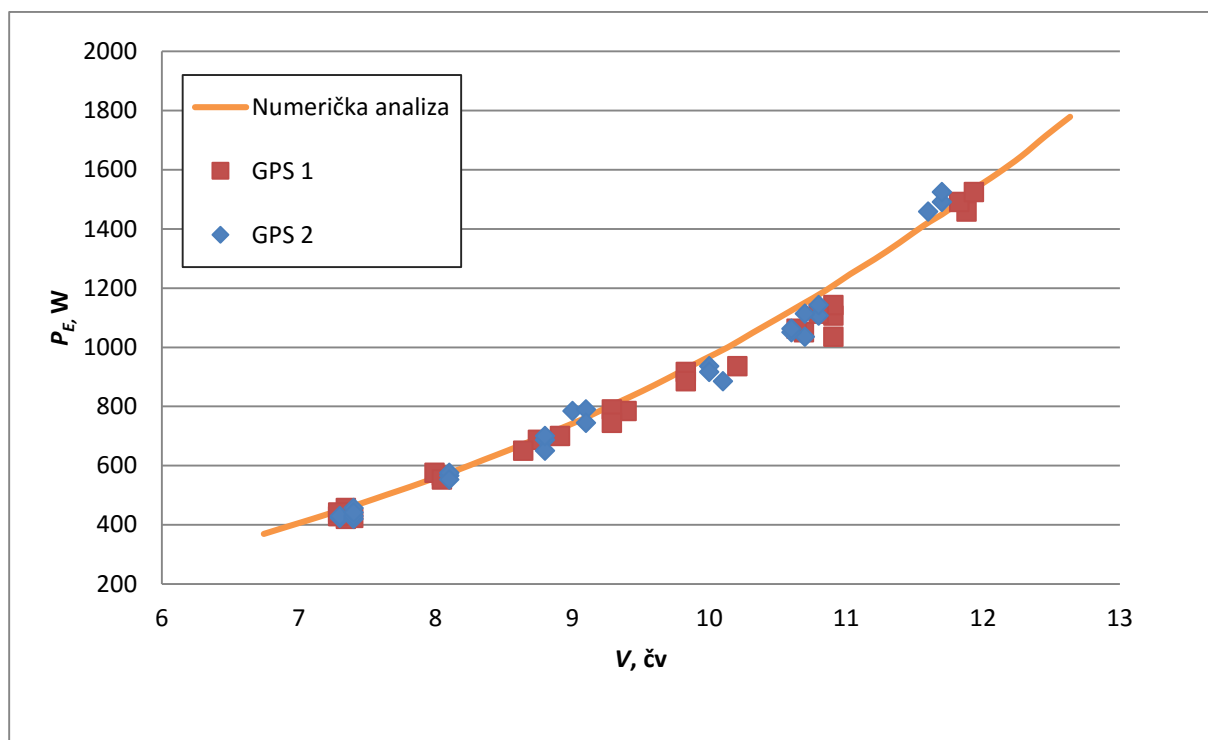
v , m/s	V , čv	R_T , kN	R_T , N	Relativna greška	Rel. greš. (%)	R_T , N Eksperimentalno	P_E , W	Relativna greška	Rel. greš. (%)	P_E , W Eksper.
3,47	6,74	0,11	106,60	0,06	6,15	100,42	369,83	0,01	0,50	367,97
3,56	6,92	0,11	111,03	0,06	5,90	104,85	395,39	0,04	3,51	381,99
3,65	7,10	0,12	115,18	0,05	5,09	109,59	420,75	0,05	4,85	401,29
3,74	7,28	0,12	119,34	0,04	4,18	114,55	446,92	0,05	5,19	424,85
3,84	7,46	0,12	123,38	0,03	3,13	119,63	473,38	0,05	4,78	451,77
3,93	7,64	0,13	127,65	0,02	2,33	124,75	501,48	0,04	4,21	481,21
4,02	7,82	0,13	131,65	0,01	1,41	129,83	529,30	0,03	3,29	512,46
4,11	7,99	0,14	135,85	0,01	0,77	134,81	558,64	0,03	2,52	544,90
4,20	8,17	0,14	139,88	0,00	0,16	139,65	588,06	0,02	1,74	578,02
4,30	8,35	0,14	144,39	0,00	0,04	144,33	620,28	0,01	1,45	611,39
4,39	8,53	0,15	148,63	0,00	0,12	148,81	652,16	0,01	1,16	644,70
4,48	8,71	0,15	153,12	0,00	0,02	153,08	685,90	0,01	1,21	677,73
4,57	8,89	0,16	157,77	0,00	0,39	157,17	721,25	0,02	1,53	710,37
4,66	9,07	0,16	162,08	0,01	0,63	161,07	755,81	0,02	1,78	742,59
4,76	9,24	0,17	167,27	0,01	1,49	164,81	795,38	0,03	2,70	774,49
4,85	9,42	0,17	171,92	0,02	2,06	168,45	833,28	0,03	3,35	806,24
4,94	9,60	0,18	176,82	0,03	2,78	172,04	873,25	0,04	4,19	838,13
5,03	9,78	0,18	182,02	0,04	3,64	175,63	915,68	0,05	5,19	870,54
5,12	9,96	0,19	187,22	0,04	4,41	179,31	959,04	0,06	6,09	903,95
5,21	10,14	0,19	191,90	0,05	4,76	183,18	1000,63	0,07	6,57	938,96
5,31	10,32	0,20	197,73	0,06	5,55	187,33	1049,17	0,07	7,47	976,23
5,40	10,49	0,20	203,07	0,06	5,83	191,88	1096,16	0,08	7,83	1016,57
5,49	10,67	0,21	208,41	0,06	5,82	196,96	1144,15	0,08	7,85	1060,85
5,58	10,85	0,21	213,62	0,05	5,38	202,71	1192,35	0,07	7,41	1110,05
5,67	11,03	0,22	219,90	0,05	5,07	209,29	1247,58	0,07	7,06	1165,27
5,77	11,21	0,23	225,14	0,04	3,82	216,86	1297,98	0,06	5,73	1227,69
5,86	11,39	0,23	230,98	0,02	2,39	225,60	1352,88	0,04	4,18	1298,59
5,95	11,56	0,24	237,22	0,01	0,65	235,70	1411,22	0,02	2,31	1379,35
6,04	11,74	0,24	242,21	0,02	2,08	247,36	1463,12	0,01	0,57	1471,47
6,13	11,92	0,25	249,54	0,04	4,32	260,81	1530,32	0,03	2,93	1576,53
6,22	12,10	0,25	254,81	0,08	7,76	276,26	1586,08	0,06	6,49	1696,22
6,32	12,28	0,26	260,53	0,11	11,38	293,97	1645,59	0,10	10,19	1832,31
6,41	12,46	0,27	267,57	0,15	14,83	314,18	1714,64	0,14	13,69	1986,70



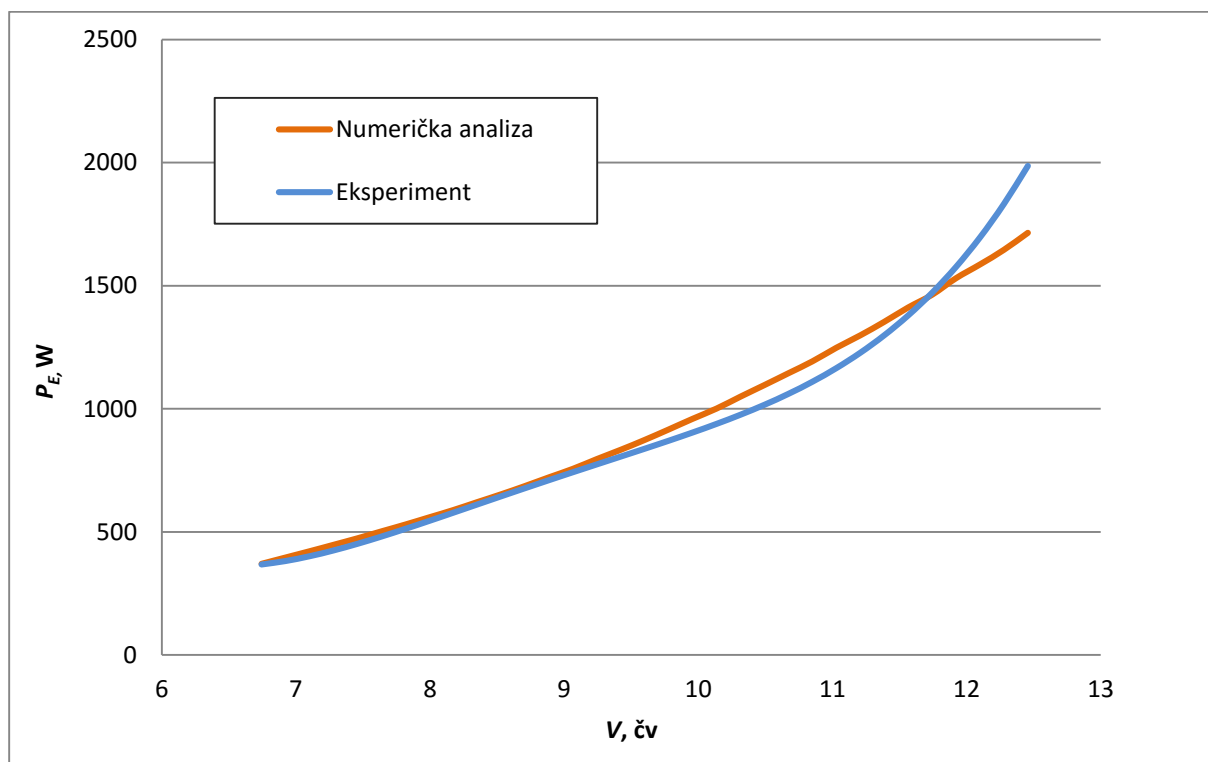
Slika 48. Usporedba numeričkog proračuna s eksperimentom (ovisnost sile otpora i brzine brodocikla u drugoj vožnji)



Slika 49. Usporedba numeričkog proračuna s eksperimentom (ovisnost sile otpora i srednje vrijednosti brzine brodocikla u drugoj vožnji)



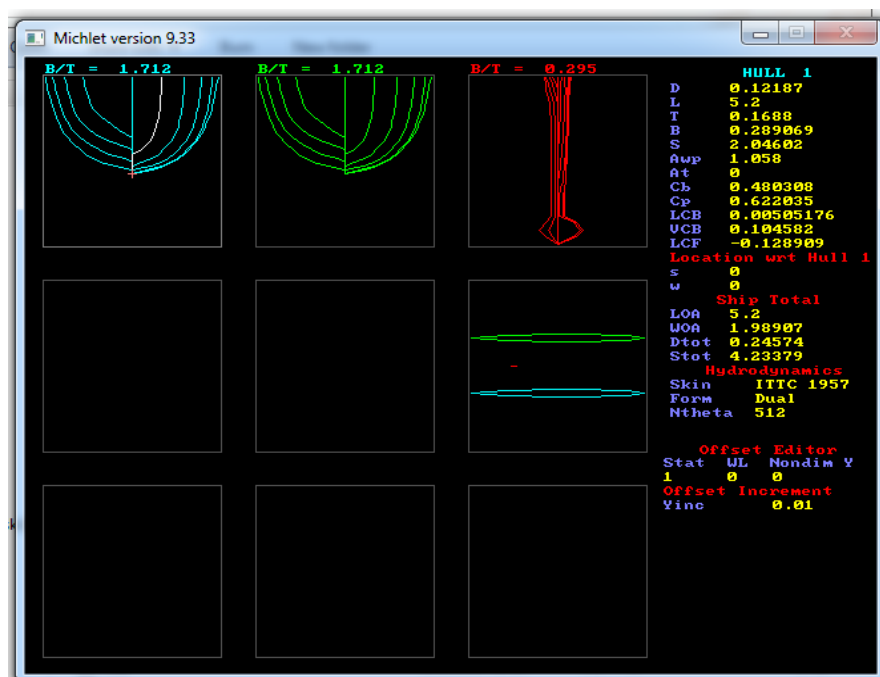
Slika 50. Usporedba numeričkog proračuna s eksperimentom (ovisnost snage i brzine brodocikla u drugoj vožnji)



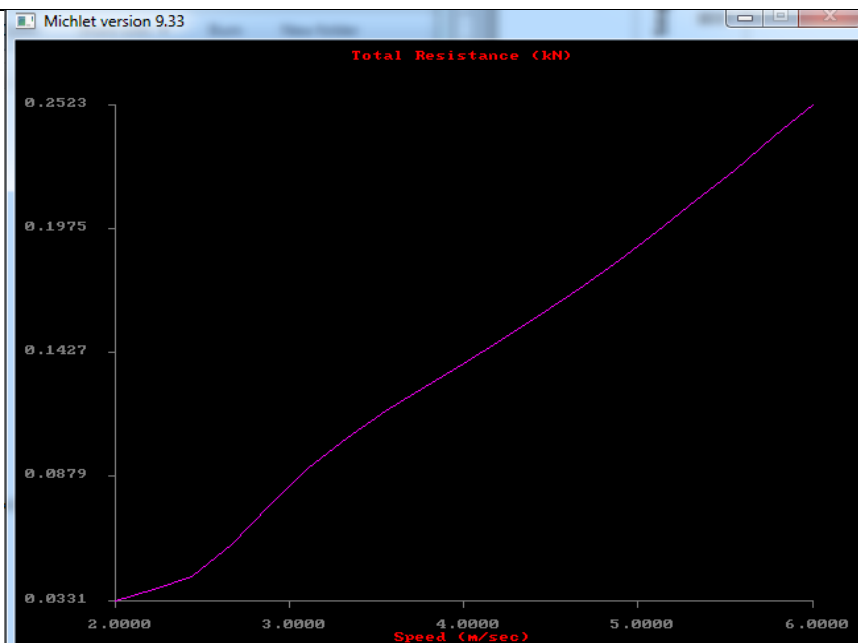
Slika 51. Usporedba numeričkog proračuna s eksperimentom (ovisnost snage i srednje vrijednosti brzine brodocikla u drugoj vožnji)

6.2. Usporedba eksperimentalnog određivanja otpora plovila s numeričkim programom u četvrtoj vožnji

U Tablici 12. vidljivo je da se relativna greška kreće u intervalima od 15 do 20 %. Razlog tome je što numerički dio proračuna ne uzima u obzir dodatni otpor koji su se stvarali tijekom pokusa, npr. hrapavost kormila, zalijevanje površine trupova i površine okvira i sl. Na Slici 52. prikazan je numerički proračun oba trupa i kormila, dok Slika 53. prikazuje krivulju ukupnog otpora dobivenu numeričkim proračunom za četvrtu vožnju.



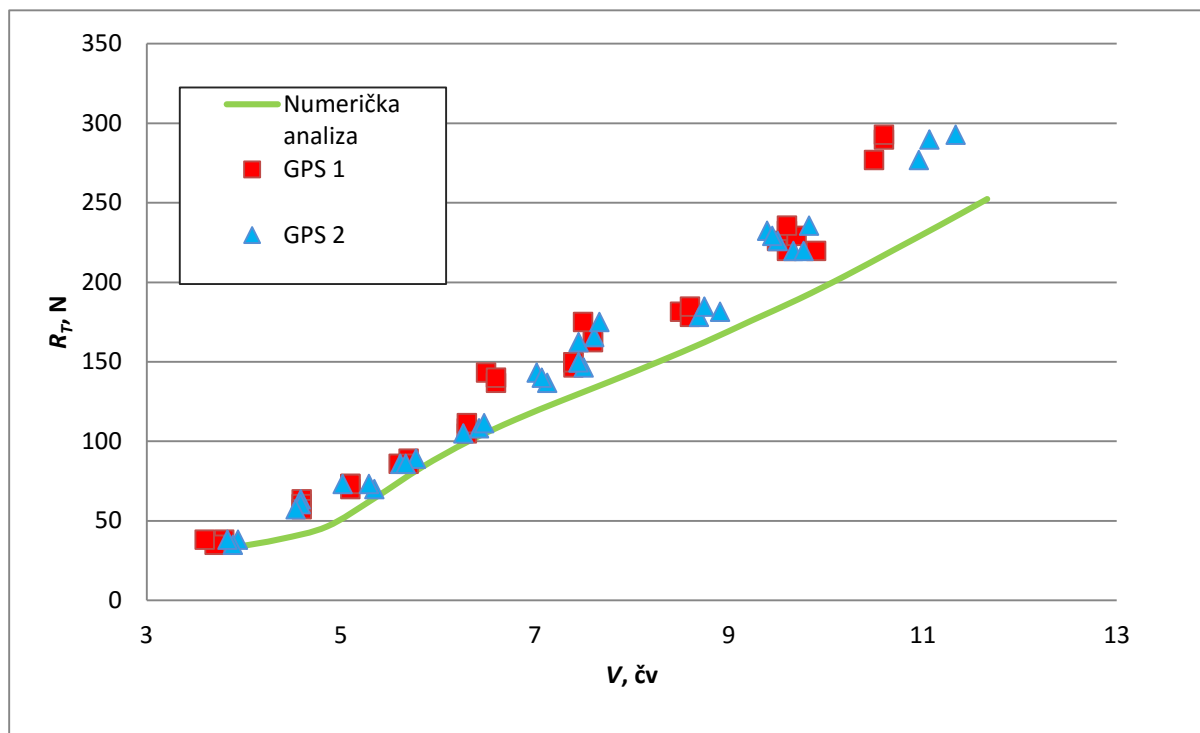
Slika 52. Numerički proračun oba trupa i kormila *Michlet* programom



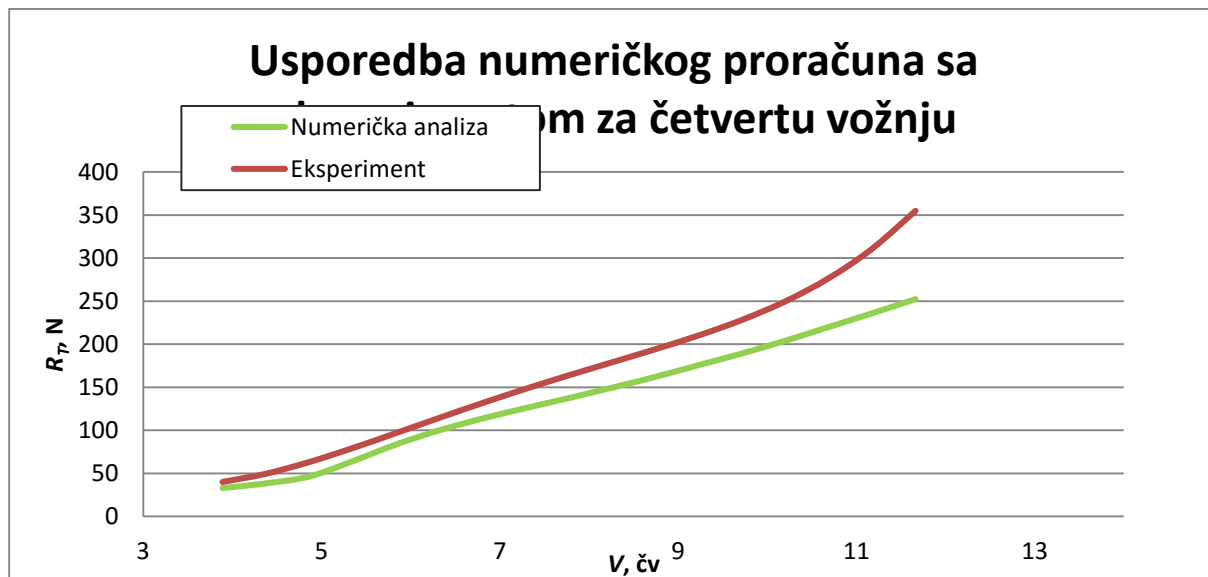
Slika 53. Krivulja ukupnog otpora dobivena numerički za četvrtu vožnju

Tablica 12. Usporedba numeričke analize i eksperimenta za četvrtu vožnju

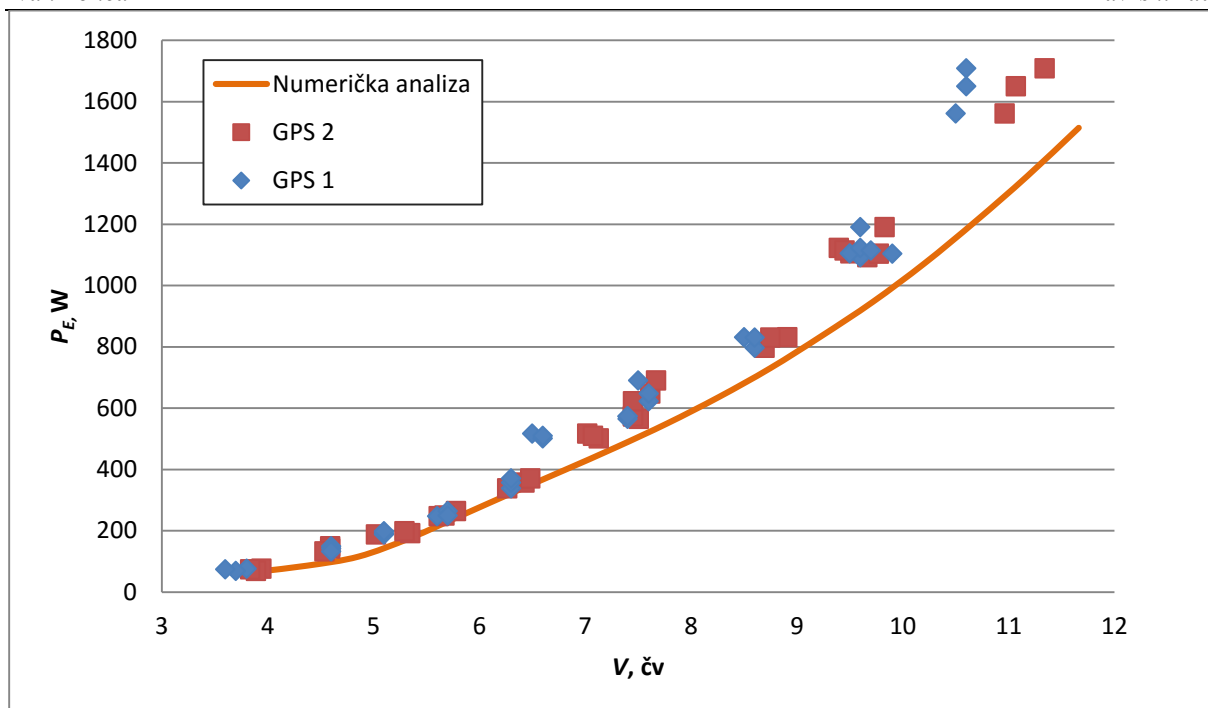
v , m/s	V , čv	R_T , kN	R_T , N	Relativna greška	Rel. greš. (%)	R_T , N Eksperimentalno	P_E , W	Relativna greška	Rel. greš. (%)	P_E , W Eksper.
2,00	3,89	0,03	33,12	0,21	21,03	40,08	66,23	0,23	22,88	81,39
2,25	4,37	0,04	38,45	0,29	28,85	49,55	86,52	0,20	19,81	103,66
2,50	4,86	0,05	46,42	0,36	36,05	63,15	116,04	0,31	31,30	152,36
2,75	5,35	0,06	64,14	0,24	23,63	79,30	176,39	0,24	24,24	219,15
3,00	5,83	0,08	83,52	0,16	15,78	96,70	250,56	0,19	18,73	297,48
3,25	6,32	0,10	100,02	0,14	14,37	114,39	325,06	0,18	17,70	382,60
3,50	6,80	0,11	113,70	0,16	15,81	131,68	397,96	0,18	18,49	471,54
3,75	7,29	0,13	125,89	0,18	17,74	148,23	472,08	0,19	19,28	563,11
4,00	7,78	0,14	137,57	0,19	19,18	163,96	550,30	0,20	19,56	657,93
4,25	8,26	0,15	149,66	0,20	19,69	179,13	636,04	0,19	19,24	758,39
4,50	8,75	0,16	162,23	0,20	19,77	194,29	730,02	0,19	18,99	868,69
4,75	9,23	0,18	175,87	0,20	19,58	210,31	835,39	0,19	19,08	994,78
5,00	9,72	0,19	189,40	0,21	20,57	228,36	947,02	0,21	20,85	1144,45
5,25	10,21	0,20	204,19	0,22	22,39	249,91	1072,00	0,24	23,81	1327,23
5,50	10,69	0,22	220,04	0,26	25,77	276,75	1210,20	0,28	28,45	1554,48
5,75	11,18	0,24	235,95	0,32	31,79	310,97	1356,72	0,36	35,57	1839,31
6,00	11,66	0,25	252,35	0,41	40,66	354,95	1514,07	0,45	45,08	2196,66



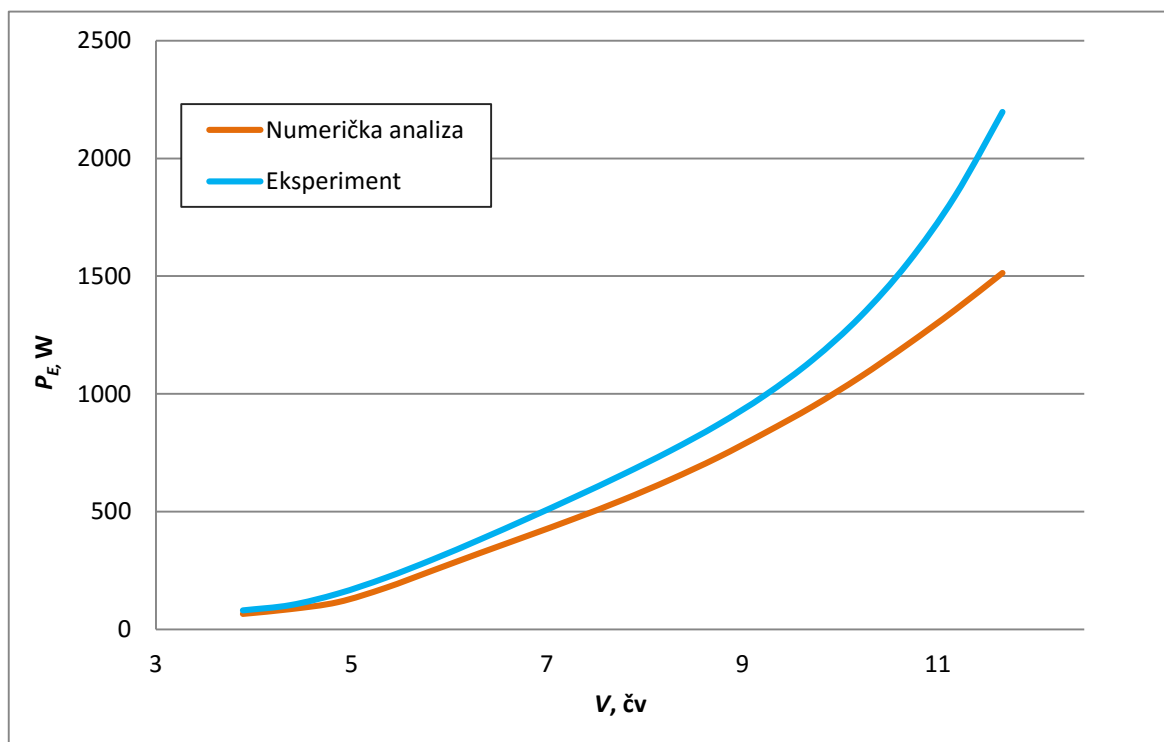
Slika 54. Usporedba numeričkog proračuna s eksperimentom (ovisnost sile otpora i brzine brodocikla u četvrtoj vožnji)



Slika 55. Usporedba numeričkog proračuna s eksperimentom (ovisnost sile otpora i srednje vrijednosti brzine brodocikla u četvrtoj vožnji)



Slika 56. Usporedba numeričkog proračuna s eksperimentom (ovisnost snage i brzine brodocikla u četvrtoj vožnji)



Slika 57. Usporedba numeričkog proračuna s eksperimentom (ovisnost snage i srednje vrijednosti brzine brodocikla u četvrtoj vožnji)

7. ZAKLJUČAK

Otpor trupa plovila osnovna je značajka pri projektiranju odgovarajućeg propulzijskog sustava plovila. Cilj ovog rada bio je eksperimentalno odrediti krivulju snage otpora plovila na ljudski pogon u ovisnosti o brzini za trupove sa i bez kormila. Rezultati dobiveni eksperimentalnim putem su uspoređeni s rezultatima dobivenima numeričkim proračunom u programskom paketu *Michlet 9.33* te su analizirana odstupanja dobivenih vrijednosti.

Na temelju dobivenih rezultata, zaključeno je kako kormilo kao dio konstrukcije brodocikla značajno povećava otpor prilikom gibanje brodocikla kroz vodu i tako utječe na efikasnost plovila što konačno utječe i na njegovu brzinu. Sukladno tomu, bilo bi korisno pronaći optimalno rješenje u svrhu smanjenja otpora brodocikla što bi eventualno bilo moguće postići promjenom samog kormila, promjenom pozicije kormila i sl. za što bi trebalo provesti nova ispitivanja. Također, kada se govori o kormilu, odnosno o dodatnim privjescima plovila, važno je napomenuti da kormilo povećava silu otpora brodocikla te da je pri brzinama manjim od 5 čvorova otpor samog kormila zanemariv, dok pri brzinama većim od 5 čvorova otpor kormila značajno raste što ujedno značajno povećava ukupni otpor brodocikla. Što se tiče usporedbe eksperimenta i numeričkog proračuna, zaključilo se da kod proračuna otpora samih trupova numerički proračun poklapa sa eksperimentom i relativna greška je unutar inženjerskih tolerancija. Pri numeričkom proračunu trupova sa privjeskom se nije dobilo dobro poklapanje rezultata sa rezultatima eksperimenta tj. greška je za neke brzine veća od 15%.

Iz prije navedenog se može zaključiti da za numerički proračun otpora brodocikla s privjescima je potrebno napraviti precizniju analizu otpora zbog uzimanja u obzir fizikalnih pojava koje su se pri numeričkom proračunu zanemarile zbog pojednostavljenja modela kao što su interferencija valova između trupova i kormila.

LITERATURA

- [1] Radan, D.: *Uvod u hidromehaniku broda*, Sveučilište u Dubrovniku, Dubrovnik, 2004.
- [2] Gamulin, A.: *Otpor i propulzija broda*, interna skripta FSB-a, Zagreb, 1998.
- [3] Ljubetić, M.: *Otpor i propulzija broda (Hidrodinamika broda)*, Sveučilište u Splitu, Dubrovnik, 1989.
- [4] ITTC Recommended Procedures and Guidelines, <http://ittc.sname.org/>.
- [5] Šilović, S.: *Otpor i propulzija broda*, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, 1968.
- [6] Insel, M., Molland A. F.: *An Investigation into the Resistance Components of High Speed Displacement Catamarans*, Trans. RINA, Vol. 134, 1992.
- [7] Kraut, B.: *Strojarski priručnik*, Tehnička knjiga Zagreb, Zagreb, 1970.